

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Univerzitní studijní programy

Katedra fyziky

**STUDIUM OBJEMOVÝCH MAGNETICKÝCH VLASTNOSTÍ
AUSTENITICKÝCH KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ PO TVÁŘENÍ
ZA STUDENA**

**STUDY OF BULK MAGNETIC PROPERTIES OF AUSTENITIC
STAINLESS STEELS AFTER COLD FORMING**

Autor:

Bc. Martin Otáhal

Vedoucí diplomové práce:

Mgr. Ing. Kamila Hrabovská, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

doc. Ing. Ondřej Životský, Ph.D.

Ostrava 2018

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Otáhal**

Studijní program: N1701 Fyzika

Studijní obor: 1702T001 Aplikovaná fyzika

Téma: **Studium objemových magnetických vlastností austenitických
korozivzdorných ocelí po tváření za studena**
**Study of bulk magnetic properties of austenitic stainless steels after cold
forming**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Předmětem diplomové práce je studium objemových magnetických vlastností austenitických korozivzdorných ocelí. Oceli budou tvářeny za studenou pomocí metody DRECE (Dual Rolling Equal Channel Extrusion) a ohybovou metodou. K výzkumu magnetických vlastností bude využit vibrační magnetometr VSM, který je schopen s vysokou citlivostí měřit objemové magnetické vlastnosti pevných látek. Zjištěné magnetické vlastnosti ocelí budou korelovány se změnou jejich vnitřní struktury po tváření za studena za podpory skenovací elektronové mikroskopie a detektoru EDX.

Diplomová práce bude rozdělena do následujících bodů:

1. Seznámení se s funkcí vibračního magnetometru VSM firmy MicroSense, jeho základním principem, měřením magnetických hysterezních smyček a jejich parametrů při pokojové teplotě.
2. Seznámení se s tvářecím zařízením využívající metodu DRECE pro tváření pásu plechu a metodou pro tváření ohybem.
3. Studium struktury austenitických korozivzdorných ocelí.
4. Srovnání magnetických objemových hysterezních smyček a jejich parametrů korozivzdorných austenitických ocelí po tváření.
5. Korelace objemových magnetických vlastností a struktury austenitických korozivzdorných ocelí za podpory skenovací elektronové mikroskopie a detektoru EDX.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. PÍŠEK, František, Ladislav JENÍČEK, Přemysl RYŠ, Mojmír CENEK a Antonín HRBEK. Nauka o materiálu. I, Nauka o kovech. 2. rozš. a zcela přeprac. vyd. Praha: Academia, 1968.
2. ASHBY, M. F. a David Rayner Hunkin JONES. Engineering materials 2: an introduction to microstructures, processing. 4th ed. Waltham: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN 978-0-08-096668-7.
3. Draft manual, (Easy VSM) – operating software for MicroSense Vibrating Sample Magnetometers

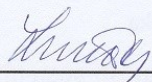
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Mgr. Kamila Hrabovská, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: doc. Ing. Ondřej Životný, Ph.D.

Datum zadání: 31.10.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018



prof. Dr. RNDr. Jiří Luňáček
vedoucí katedry



Ing. Zdeňka Chmelíková, Ph.D.
prorektorka pro studium

Mistopřísežné prohlášení

- ***Celou diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.***
- ***Byl jsem seznámen s tím, že na moji práci se plně vztahuje č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a §60 školní dílo.***
- ***Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vlastní potřebě, práci užít (§35 odst. 3).***
- ***Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.***
- ***Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.***
- ***Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu komerčnímu užití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).***
- ***Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.***

Jméno a příjmení: Bc. Martin Otáhal

Bydliště: Hornopolská 53, Ostrava 1, 70200, ČR

Datum odevzdání:

Podpis:

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval za odborné vedení paní Ing. Mgr. Kamile Hrabovské, Ph.D., doc. Ing. Ondřeji Životskému, Ph.D. a také prof. Ing. Liboru Hlaváčovi, Ph.D. za přípravu vzorků ocelí řezáním kapalinovým paprskem, Ing. Yvonně Jiráskové, Ph.D. z Ústavu fyziky materiálů – Akademie věd České republiky v.v.i. v Brně za podporu při analýze vybraných vzorků s využitím Mössbauerovy spektroskopie, Ing. Lucii Gembalové, Ph.D. za umožnění provedení SEM analýzy a chemické analýzy povrchu vybraných typů ocelí.

Tváření vzorků za studena metodou DRECE proběhlo v laboratoři Katedry Mechanické technologie FS, Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava. Poděkování za umožnění realizace náleží prof. Ing. Stanislavu Ruszovi, CSc.

Tváření vzorků ohybem bylo provedeno v Laboratoři integrity konstrukcí a designu materiálu Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava. Poděkování za umožnění realizace patří Ing. Vratislavu Mareši.

Metalografický rozbor vzorků ocelí a měření mikrotvrdosti bylo provedeno na Fakultě metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava. Poděkování za umožnění realizace patří Ing. Petře Váňové, Ph.D.

Žihání vzorků bylo provedeno v centru RMTVC Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava. Poděkování patří prof. Ing. Jaromíru Drápalovi, CSc. a doc. Ing. Silvii Brožové, Ph.D..

Tato diplomová práce byla vypracována s podporou projektů: Regionální Materiálově Technologické Výzkumné Centrum – RMTVC (číslo CZ.1.05/2.1.00/01.0040) a Regionální Materiálově Technologické Výzkumné Centrum – Program udržitelnosti (číslo LO 1203), ze kterých byl pořízen vibrační magnetometr (VSM EV9 od firmy Microsense), prostřednictvím něhož byla uskutečněna měření magnetických hysterezních křivek ocelí před a po tváření. Za finanční podporu také děkuji projektu SGS SP 2018/43.

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je studium objemových magnetických vlastností austenitických korozivzdorných ocelí po tváření za studena. Některé typy těchto ocelí vykazují po tváření za studena změnu vnitřní struktury - dojde k tvorbě martenzitu, která způsobí významnou změnu magnetických vlastností. Ocel poté vykazuje vyšší hodnoty remanentní magnetizace a magnetizace při intenzitě magnetického pole 20 kOe. Takto tvářená korozivzdorná austenitická ocel se již nedá využít pro některé technické aplikace, kde je paramagnetický materiál nutností.

Objemové magnetické vlastnosti ocelí před tvářením a po tváření za studena byly hodnoceny pomocí vibračního magnetometru VSM EV9 firmy Microsense. Struktura korozivzdorných austenitických ocelí byla studována pomocí Mössbauerovy spektroskopie, metalografickým rozbořem, analýzou chemického složení pomocí skenovacího elektronového mikroskopu a zkouškou mikrotvrdosti podle Vickerse.

Klíčová slova: austenitická korozivzdorná ocel; austenit; tváření za studena; vibrační magnetometr; martenzit; Mössbauerova spektroskopie; metalografický rozbor; remanentní magnetizace; magnetizace; tváření – metoda DRECE; tváření zkouškou ohybem

Citace: OTÁHAL, Martin. *Studium objemových magnetických vlastností austenitických korozivzdorných ocelí po tváření za studena*. Ostrava 2018. Diplomová práce (Ing.). Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Katedra fyziky. Vedoucí práce Mgr. Ing. Kamila Hrabovská Ph.D. .

ABSTRACT

Goal of this thesis is investigation of bulk magnetic properties of austenitic stainless steels after cold forming. Some types of austenitic stainless steels exhibit change of internal structure after cold forming. This leads to origin of martensite structure having markedly different magnetic properties, typically higher remanent and saturation magnetization. Steel exhibits increased remanent magnetization and magnetization in magnetic field 20 kOe. Austenite stainless steel after cold forming is therefore unsuitable for some applications, where it is necessary to work with paramagnetic materials.

Bulk magnetic properties of steels before and after cold forming were studied using the vibrating sample magnetometer VSM EV9 of Microsense company. Structure of austenitic steels was determined by Mössbauer spectroscopy, metallography, chemical analysis performed by scanning electron microscopy, and microhardness Vickers test.

Keywords: austenite; austenitic stainless steel; cold forming; forming – DRECE method; bending test; martensite; Mössbauer spectroscopy; metallography; remanent magnetization, magnetization; vibrating sample magnetometer

Citation: OTÁHAL, Martin. *Study of bulk magnetic properties of austenitic stainless steels after cold forming*. OSTRAVA 2018. Diploma thesis (Ing.). VŠB-TUO. Department of Physics. Thesis supervisor Mgr. Ing. Kamila Hrabovská Ph.D. .

Obsah

1	ÚVOD	1
2	TECHNICKÉ ŽELEZO A JEHO SLITINY	3
3	KOROZIVZDORNÁ OCEL	8
3.1	Korozivzdorné austenitické oceli.....	9
3.2	Struktura austenitických korozivzdorných ocelí.....	11
3.3	Tváření korozivzdorné austenitické oceli	13
4	MAGNETICKÉ VLASTNOSTI LÁTEK	15
4.1	Diamagnetismus.....	18
4.2	Paramagnetismus	19
4.3	Feromagnetismus	20
4.4	Magnetizační křivka	23
4.5	Magnetické vlastnosti austenitických korozivzdorných ocelí	24
5	METODIKA EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ.....	26
6	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ Z KOROZIVZDORNÉ AUSTENITICKÉ OCELI.....	27
6.1	Typy zkoumaných ocelí.....	27
6.2	Metoda tváření DRECE	30
6.3	Metoda tváření ohybem dle normy ČSN EN ISO 7438:2016	33
6.4	Žíhání vzorků austenitických korozivzdorných ocelí	34
7	EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY NA VZORCÍCH PŘED A PO TVÁŘENÍ ZA STUDENA.....	35
7.1	SEM analýza a chemická analýza povrchu korozivzdorných austenitických ocelí před tvářením	35
7.2	Měření objemových magnetizačních křivek ocelí před tvářením, po tváření metodou DRECE a po žíhání.....	38
7.3	Měření objemových magnetizačních křivek ocelí po tváření ohybem dle normy ČSN EN ISO 7438:2016	46
7.4	Mössbauerova spektroskopie ocelí před tvářením a po tváření metodou DRECE	49
7.5	Metalografický rozbor struktury ocelí před tvářením a po tváření metodou DRECE	56
7.6	Měření mikrotvrdosti podle Vickerse na příčném řezu ocelí po tváření metodou DRECE	61
8	ZÁVĚR	64
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	67
10	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	69
11	SEZNAM TABULEK	71
12	SEZNAM PŘÍLOH.....	72

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ PRO MĚŘENÉ VELIČINY

Veličina	Popis	Jednotka
a	mřížkový parametr	(m)
\vec{B}	magnetická indukce	(T)
d	délka úhlopříčky vtisku při měření mikrotvrdosti	(m)
e	elektrický náboj elektronu	(C)
\vec{H}	intenzita magnetického pole	(A·m ⁻¹)
H_c	koercitivní pole	(A·m ⁻¹)
I	elektrický proud	(A)
k	Boltzmannova konstanta	(J·K ⁻¹)
\vec{M}	magnetizace objemová	(A·m ⁻¹)
M_s	magnetizace v saturaci	(A·m ⁻¹)
M_r	remanentní hmotnostní magnetizace	(A·m ² ·kg ⁻¹)
m	hmotnost	(kg)
m_e	hmotnost elektronu	(kg)
R_m	mez pevnosti	(MPa)
R_p 0,2	mez kluzu při relativním prodloužení 0,2 %	(MPa)
T	teplota	(K)
T_c	Curieova teplota	(K)
Cr_{ekv}	chromový ekvivalent	(%)
Ni_{ekv}	niklový ekvivalent	(%)
μ	permeabilita	(H·m ⁻¹)
μ_r	relativní permeabilita	(-)
μ_0	permeabilita vakua	(H·m ⁻¹)
μ_B	Bohrův magneton	(J·T ⁻¹)
$\vec{\mu}_m$	magnetický moment	(A·m ²)
χ_m	magnetická susceptibilita	(-)
ω_L	Larmorova frekvence	(s ⁻¹)

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ PRO POUŽÍVANÉ EXPERIMENTÁLNÍ METODY A SOUSTAVY JEDNOTEK

SEM	Skenovací elektronová mikroskopie
γ -BMS	Mössbauerova spektroskopie s detekcí zpětně rozptýleného gama záření
VSM	Vibrační magnetometr
EDX	Rentgenová disperzní analýza
CGS	Metrická soustava jednotek (starší systém jednotek)
SI	Mezinárodní soustava jednotek fyzikálních veličin

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ PRO ANALYZOVANÉ EXPERIMENTÁLNÍ VZORKY

Zkratky použité v následující kapitole

- **N** – Netvářená ocel, pás oceli po zakoupení
- **T** – Tvářená ocel, pás oceli tvářený metodou DRECE
- **Z** – Žíhaná ocel, ocel žíhaná ve vakuu při teplotě 950 °C pod dobu 30 minut

Příklad:

1.4307N

Ocel 1.4307, analyzovaná netvářená ocel po zakoupení. Jedinou modifikací před vlastním měřením bylo vyříznutí experimentálního vzorku kapalinovým paprskem.

1.4404T

Ocel 1.4404, analyzovaná ocel po tváření za studena metodou DRECE ($\alpha = 108^\circ$), experimentální vzorek byl následně z oceli vyřezán kapalinovým paprskem.

1.4845Z

Ocel 1.4845, analyzovaná ocel po žíhání ve vakuu při teplotě 950 °C po dobu 30 minut a pomalém ochlazování po dobu 24 hodin ve vakuu. Experimentální vzorek byl vyřezán kapalinovým paprskem z ocelového plechu po tváření metodou DRECE, následně byl žíhán.

1 ÚVOD

Rostoucí agresivita prostředí zvyšuje nároky na korozní odolnost průmyslových výrobků, strojů a zařízení. Zejména energetické strojírenství, automobilový průmysl a nejrychleji se rozvíjející oblast techniky – vývoj elektromagnetických systémů se neobejdou bez materiálů odolávajících koroznímu prostředí i při zvýšených a vysokých teplotách. Zde v mnoha případech nacházejí uplatnění korozivzdorné oceli, které jsou nenahraditelné díky své odolnosti proti korozi, zpracovatelnosti a mechanickým vlastnostem.

Elektronické systémy mohou být umístěny např. v korozně odolném pouzdře vyrobeném z korozivzdorné oceli, v blízkosti konstrukce z korozivzdorné oceli (např. ocelové výztužné tyče pro radarové instalace), nebo korozivzdorná ocel tvoří součást elektrického systému, např. solenoid. V těchto případech jsou také důležité magnetické vlastnosti těchto ocelí. Magnetická pole mohou nežádoucím způsobem ovlivňovat činnost citlivých elektronických a mechanických měřicích přístrojů, např. magnetismus elektro skříní vyrobených z korozivzdorných ocelí může nepříznivě ovlivňovat fungování elektronického vybavení. Na druhou stranu další systémy, jako jsou např. elektromagnetické ventily, elektronické vstřikovače paliva u benzínových motorů mohou fungovat pouze v případě, že jejich pracovní část je vyrobena z feromagnetické korozivzdorné oceli a vykazuje magneticky měkké vlastnosti.

Korozivzdorné austenitické oceli jsou také používány v medicíně jako biomateriály, vykazují bio kompatibilitu a odolnost proti korozi. Ve spojitosti s magnetismem je nutno upozornit na možnost ovlivnění práce elektronických implantátů (obsahujících části z korozivzdorných ocelí), které podporují základní životní funkce orgánů lidského těla (např. kardiostimulátory, mozkové implantáty, kochleární implantáty, infuzní a inzulinové pumpy atd.) s možnými následky pro nositele těchto implantátů [1].

Korozivzdorné oceli vykazují rozmanitost v magnetických vlastnostech, která je závislá na jejich vnitřní struktuře. Magnetické vlastnosti těchto ocelí jsou velmi důležitou funkcí pro jejich použití a je nutné věnovat těmto vlastnostem speciální pozornost.

V současné době materiálové listy korozivzdorných ocelí od jednotlivých výrobců a dodavatelů určují jen, zda jsou tyto oceli magnetické nebo nemagnetické. Toto rozdělení je určováno dle výchozí struktury oceli (austenitická – nemagnetická, feritická – magnetická). Výsledky této práce ukazují na nezbytnost, opatřit materiálové listy

korozivzdorných austenitických ocelí informacemi o možném výskytu magnetismu po tváření za studena.

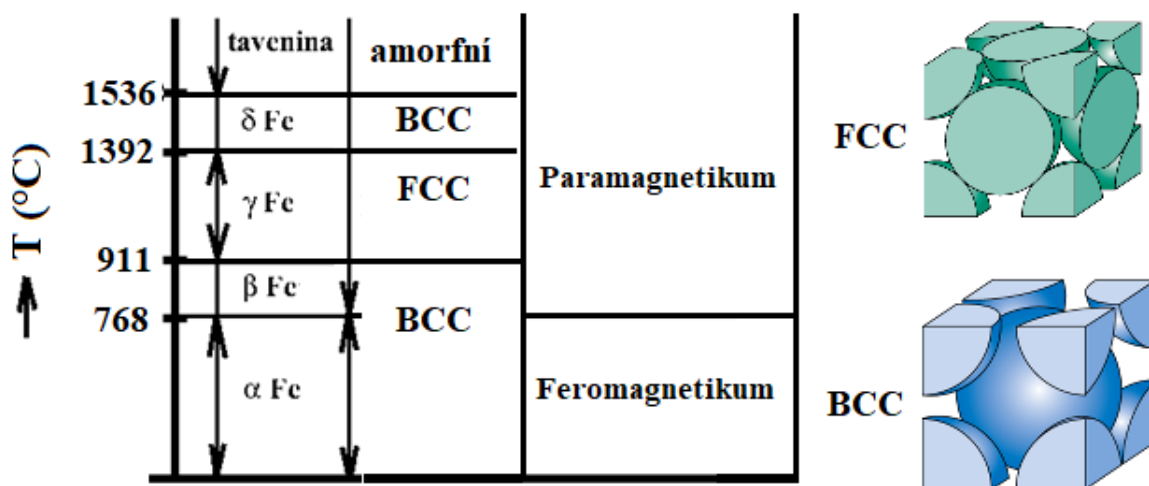
Diplomová práce je věnována měření objemových magnetických vlastností austenitických korozivzdorných ocelí po tváření za studena. V materiálových listech těchto ocelí se uvádí, že tyto oceli jsou nemagnetické. Objemové magnetické vlastnosti ocelí před tvářením a po tváření za studena byly analyzovány pomocí vibračního magnetometru VSM EV9 firmy Microsense. Struktura korozivzdorných austenitických ocelí byla studována pomocí Mössbauerovy spektroskopie, metalografickým rozbořem, analýzou chemického složení pomocí skenovacího elektronového mikroskopu a zkouškou mikrotvrdosti podle Vickerse.

2 TECHNICKÉ ŽELEZO A JEHO SLITINY

Technické železo a jeho slitiny jsou dosud nejvíce používanými slitinami v technické praxi. Technické železo je tuhý roztok železa s prvky, které významně určují jeho vlastnosti. Nejdůležitějším prvkem je uhlík, podle jehož obsahu lze technické železo rozdělit na železo nekujné (obsah uhlíku je vyšší než 2 %), z něhož se vyrábí litina, a železo kujné (obsah uhlíku obvykle nepřevyšuje 2 %), které je výchozí surovinou pro výrobu oceli.

Železo (chemická značka Fe, latinsky Ferrum) je přechodný kovový prvek a patří mezi nejrozšířenější kovy na Zemi. Protonové číslo 26, relativní atomová hmotnost 55,847, teplota tání 1538 °C (1811,15 K), měrná hmotnost železa 7 870 kg·m⁻³, měrná tepelná kapacita 452 J·kg⁻¹·K⁻¹, modul pružnosti v tahu 204 GPa, mez pevnosti v tahu 180-250 MPa. Čisté železo je kov měkký, tvárný s nízkou pevností. [2]

Železo je polymorfní kov a vyskytuje se v několika alotropických modifikacích. Železem α se nazývá kubická prostorově centrovaná struktura železa. Železo α je feromagnetické až do teploty 768 °C, tzv. Curieovy teploty. V rozmezí 768 °C až 911 °C se označuje jako železo β . Železo γ je kubická plošně centrovaná struktura železa, která je stálá mezi teplotami 911 °C a 1392 °C. Mřížkový parametr železa γ je větší než u železa α . Vysokoteplotní modifikace železa (nad 1392 °C) se označuje jako železo δ . [3]



Obrázek 1 – Diagram polymorfie čistého železa.

Tabulka 1 – Polymorfie železa. [2]

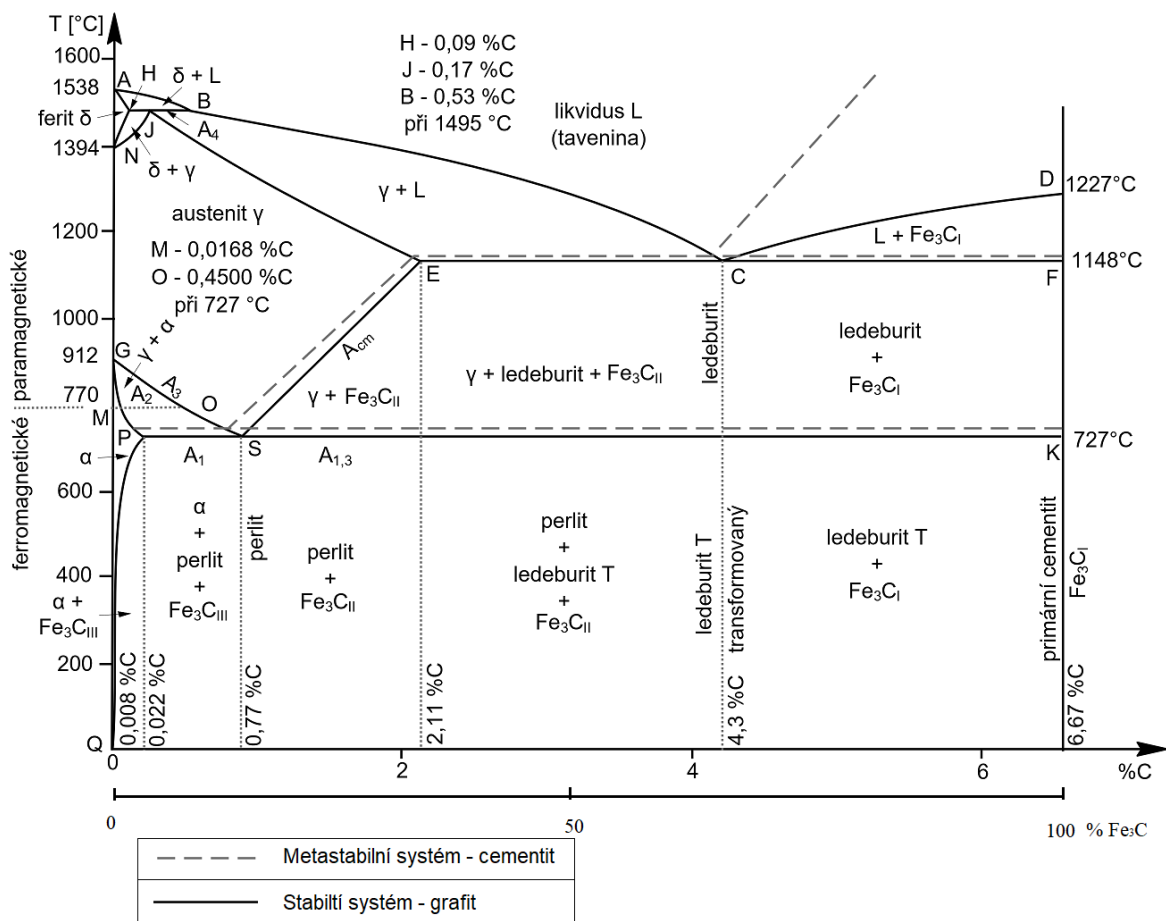
Fáze Fe	Teplota (°C)	Typ mřížky	Mřížkový parametr a
Železo α, β	do 911	BCC (9 atomů)	$a = 2,86 \cdot 10^{-10} \text{ m}$
Železo γ	od 911 do 1392	FCC (14 atomů)	$a = 3,64 \cdot 10^{-10} \text{ m}$
Železo δ	od 1392 do 1536	BCC (9 atomů)	$a = 2,93 \cdot 10^{-10} \text{ m}$

Pozn. BCC je „Body centered cubic“, FCC je „Face centered cubic“

Rovnovážný diagram železo – uhlík popisuje systém, ve kterém lze v závislosti na obsahu uhlíku a teplotě odečíst fázové a strukturní přeměny ve slitině železo – uhlík. Kromě železa v převažující koncentraci a uhlíku jsou v této slitině obsaženy ještě prospěšné prvky, např. mangan, křemík, atd., ale i škodlivé prvky, zejména fosfor a síra. Nejpodstatnější prvek (kromě železa), který je obsažen ve slitině, je uhlík, jehož i malé změny koncentrace mají významný dopad na vlastnosti výsledné slitiny. Jako oceli se označují slitiny do obsahu 2,14 % uhlíku, nad koncentrací 2,14 % uhlíku se slitiny železo – uhlík nazývají litiny.

Podle formy vyloučení uhlíku se rozlišují dva typy rovnovážného binárního diagramu železo – uhlík: buď diagram metastabilní soustavy Fe – Fe₃C nebo diagram stabilní soustavy Fe – C. Diagram metastabilní soustavy, ve které je uhlík vyloučen jako karbid železa Fe₃C (cementit), se používá pro oceli a bílou litinu. Diagram stabilní soustavy, ve které je uhlík vyloučen ve formě grafitu, se používá pro šedé litiny.

Rovnovážný diagram je významný pouze při pomalém ochlazování slitiny, kdy se rychlost ochlazování limitně blíží nule. Při vyšších rychlostech ochlazování je nutné použít diagramy izotermického rozpadu austenitu (IRA) nebo anizotermického rozpadu austenitu (ARA).



Obrázek 2 – Fázový diagram železo – uhlík. [4]

Uhlík výrazně mění vlastnosti železa a rozhodujícím způsobem ovlivňuje jeho výslednou strukturu. Tvoří se železem intersticiální tuhé roztoky:

- ferit (intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe α)
- austenit (intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe γ)
- δ ferit (intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe δ)
- Ferit

Je to intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe α nebo δ . Hovoříme tedy o α -feritu nebo δ -feritu. Nejvyšší rozpustnost uhlíku je při eutektoidní teplotě, což je teplota eutektoidní polymorfni přeměny oceli – odpovídá teplotě asi 723 $^{\circ}\text{C}$ při normálním tlaku. Ferit α je při této teplotě nasycený při koncentraci uhlíku 0,022 hm. %. Menší rozpustnost uhlíku ve feritu oproti austenitu je způsobena menší mezerou mezi atomy ve feritu. Krystaly feritu jsou světlé, za studena měkké a tvárné, těmito vlastnostmi se vyznačují i oceli s větším podílem feritu (nizkouhlíkové oceli). Ferit je feromagnetický při teplotách do 769 $^{\circ}\text{C}$. Právě tato složka dodává oceli a litině jejich magnetické vlastnosti. Při zvýšení teploty dojde k přeměně na paramagnetikum.

➤ Austenit

Austenit je tuhý roztok uhlíku v železe γ . Uhlík je uložen ve středech hran a středu elementární buňky železa γ . Atomy vykonávají kolem svých poloh kmitavé pohyby, jejichž amplituda roste s teplotou. Mezery mřížky železa γ jsou menší než je velikost atomů uhlíku, proto množství atomů uhlíku, jež se může umístit mezi atomy železa, je závislé na velikosti amplitudy kmitů \rightarrow čím větší teplota, tím je možné umístit více atomů uhlíku. Přesto atomy uhlíku zabírají v austenitu maximálně 1/11 všech možných poloh. To odpovídá maximálnímu hmotnostnímu poměru uhlíku při 2,14 hm. % při eutektické teplotě 1147 °C.

Mangan, křemík, nikl a chrom tvoří v austenitu se železem tuhý substituční roztok. Dusík a vodík tvoří v austenitu se železem tuhý intersticiální roztok. Mangan a nikl rozšiřují oblast austenitu výrazně k nižším teplotám a umožňují nám vytvořit austenitické oceli za pokojových teplot.

➤ Cementit

Karbid železa nebo také cementit Fe_3C , je sloučenina železa a uhlíku. Obsahuje 6,68 hm. % uhlíku. Tato látka má orthorombickou krystalovou strukturu. Je to velmi tvrdý (až 650 HV) a křehký materiál se světlými krystaly, který má velký význam v metalurgii ocelí. Cementit vzniká precipitací při chladnutí oceli nebo bílé litiny z teploty austenitizace. Je feromagnetický do teploty 217 °C. Tzv. primární cementit vzniká v metastabilní soustavě jako součást eutektika – ledeburitu, sekundární cementit se vylučuje z taveniny podle křivky ES a terciární při hranici feritu α (křivka PQ, obr. 2) do eutektické teploty.

➤ Ledeburit

Ledeburit je eutektikum metastabilní soustavy Fe – Fe_3C . Není to fáze, ale fázová směs složená z austenitu a cementitu (Fe_3C). Při ochlazení taveniny na teplotu 1147 °C s obsahem uhlíku 4,3 % ztuhne tavenina na ledeburit. Ledeburit je poměrně křehký, má bílé lesklé a velmi tvrdé krystaly. Pod mikroskopem jsou zřetelné lamelární struktury cementitu.

➤ Perlit

Podobně jako u ledeburitu je i perlit fázová směs, a to cementitu a feritu. Vzniká rozpadem austenitu při ochlazování na teplotě 727 °C. Složení perlitu i jeho teplota vzniku je v diagramu určena bodem S, který je eutektoidním bodem. V ocelích s obsahem uhlíku pod 0,765 hm. %, tj. podeutektoidních, se při pomalém ochlazování pod teplotami čáry

GOS (obr. 2) vylučuje z austenitu ferit a tím se austenit obohacuje o uhlík, až při teplotě 727 °C dosáhne austenit 0,765 hm. % uhlíku a přemění se na perlit. V ocelích nadeutektoidních a litinách podeutektických princip pracuje podobně tj., po dosažení vhodných podmínek se austenit přemění na perlit. V nadeutektických litinách je obsažen primární cementit a ledeburit, které se při snižování teploty rovněž přeměňují na perlit.

➤ Grafit

Grafit jako takový se vyskytuje v ocelích jen vzácně. Příčinou bývá, buď značná přítomnost křemíku, nebo vysoký obsah uhlíku jako vada zvaná černý lom. Grafit může krystalizovat buď z taveniny nebo z cementitu. Samotný grafit se v železe považuje za nežádoucí. [3]

Binární diagramy obou soustav popisují pouze slitinu železo – uhlík bez vlivů dalších prvků, které se ve slitině nacházejí. Prvky, které jsou v těchto slitinách přítomny z výroby, ať už jsou to prvky žádoucí nebo škodlivé, jistým způsobem mění binární diagramy. Jednak to jsou feritotvorné prvky, které uzavírají (zmenšují) oblast austenitu takovým způsobem, že pro jistá složení ocelí není dosaženo austenitu při žádné teplotě. Takovými prvky jsou např. chrom, křemík, molybden, wolfram, vanad. Austenitotvorné prvky naopak otvírají (rozšiřují) oblast austenitu a je možné dosáhnout austenitické struktury i za normální teploty, takovými prvky jsou uhlík, nikl, mangan a měď. Karbidotvorné, nitridotvorné prvky a karbonitridové prvky se slučují s uhlíkem nebo dusíkem, případně oběma při vzniku precipitátů, které mají velký vliv na chemické (např. korozivzdornost) i fyzikální (např. pevnost či tažnost) vlastnosti ocelí. Takovými prvky bývají např. titan, hliník, vanad, wolfram, chrom atd..

3 KOROZIVZDORNÁ OCEL

Korozivzdorná ocel (nerezová ocel) je vysokolegovaná ocel se zvýšenou odolností vůči chemické i elektrochemické korozi. Aby se ocel mohla považovat za korozivzdornou, musí obsahovat nejméně 12 hm. % chromu v tuhém roztoku. Vysoký obsah chromu zaručí pasivitu povrchu oceli. Pasivitu definujeme jako elektroneutralitu materiálu v daném korozním prostředí. I když je pasivita korozivzdorných ocelí vůči celkové korozi dosažena, jsou tyto oceli v některých prostředích náchylné k místním druhům koroze, jako je koroze bodová, štěrbinová, mezikrystalová s korozním praskáním. Proto se kromě chromu používají i další legující prvky (např. nikl, molybden, měď, apod.), které zvyšují korozní odolnost pro daný typ koroze.

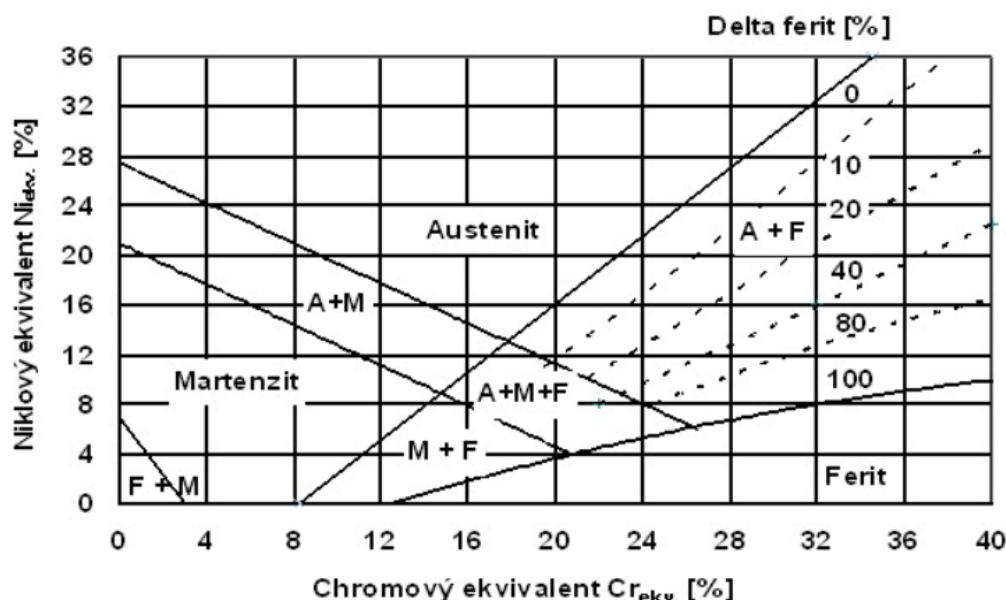
Podle chemického složení dělíme tyto oceli na chromové, chromniklové a chrommanganové.

Podle struktury dělíme korozivzdorné oceli do několika základních skupin:

- martenzitické (0,15 – 1,5 % C, 12 – 18 % Cr)
- feritické (zpravidla $\leq 0,1$ % C, 12 – 30 % Cr)
- austenitické ($\leq 0,1$ % C, 12 – 25 % Cr, 8 – 30 % Ni, nebo $\leq 0,1$ % C, 10 – 18 % Cr, 14 – 25 % Mn)
- přechodové skupiny s dvoufázovou strukturou: feriticko – austenitické (duplexní) (20 – 30 % Cr, 2,5 – 7 % Ni, Ti, Mo), martenziticko-austenitické a poloferitické oceli (0,1 – 0,4 % C, 7 – 18 % Cr)

Struktura korozivzdorných ocelí závisí na obsahu prvků, které oblasti austenitu a feritu rozšiřují nebo zužují. Pokud prvky rozšiřují oblast austenitu, nazývají se austenitotvorné a pokud rozšiřují oblast feritu, jsou to prvky feritotvorné.

Pro získání odhadu struktury korozivzdorné oceli při pokojové teplotě se používá Schaefflerův diagram, který určí složení na základě chromového a niklového ekvivalentu (chrom představuje feritotvorný prvek, nikl austenitotvorný). [4]



Obrázek 3 – Schaefflerův diagram. [5]

Vztahy pro výpočet jednotlivých koeficientů se mohou v různých literaturách lišit. Svislá osa diagramu představuje ekvivalent niklu, který je dán vztahem:

$$Ni_{ekv} = Ni + 0,5 \cdot Mn + 30 \cdot C + 30 \cdot N \quad (1)$$

Vodorovná osa představuje ekvivalent chromu, který je dán vztahem:

$$Cr_{ekv} = Cr + 2 \cdot Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb + 0,5 \cdot Ti \quad (2)$$

Chemické symboly představují koncentraci v hmotnostních % dotčeného chemického prvku. [5]

3.1 Korozivzdorné austenitické oceli

Korozivzdorné austenitické oceli jsou aplikovány v chemickém, potravinářském, farmaceutickém průmyslu a zdravotnictví, energetickém průmyslu, ve výrobě kuchyňských potřeb, v dopravě a nově v architektuře a stavebnictví. Tyto oceli zajišťují kompletní sortiment hutního materiálu (plechy, tyče, trubky, dráty, výkovky apod.). Volbu těchto ocelí je vždy nutno provádět na základě konkrétního prostředí a pravděpodobnosti vzniku různých druhů korozního napadení.

Tyto oceli dosahují austenitické struktury při pokojové teplotě i za teplot pod bodem mrazu. Tuto strukturu zajišťuje dostatek tzv. austenitotvorných prvků, např. nikl, mangan, uhlík a dusík. Dalšími legujícími prvky jsou měď a molybden, tyto prvky jsou zodpovědné za zvýšené korozní odolnosti. Austenitické oceli jsou náchylné ke korozi mezikrystalové, jejíž příčinou jsou segregáty karbidů chromu na rozhraní zrn austenitu. Běžné austenitické oceli se používají do teplot 400 °C. Austenitické oceli se liší od chromových ocelí

feritických nebo martenzitických používají i v aktivním stavu (není vyžadována elektroneutralita v daném korozním prostředí).

Tabulka 2 – Legující prvky korozivzdorných austenitických ocelí. [6] [7]

PRVEK	vlastnosti korozivzdorných austenitických ocelí
Chrómov	Je to feritotvorný prvek, který je základní přísadou všech korozivzdorných ocelí. Zajišťuje stav pasivity. Zvyšuje výrazně odolnost v oxidačních prostředích.
Nikl	Je to austenitotvorný prvek, stabilizuje austenit při pokojové i nižší teplotě a za plastické deformace. Zvyšuje odolnost vůči redukčním kyselinám. Zvýšení obsahu niklu umožní zvýšit obsah chrómu bez rizika ztráty austenitu.
Mangan	Je to austenitotvorný prvek. Nad 3 % omezuje praskání svarů. V nižších teplotách se chová podobně jako nikl, ve vyšších ale nerozšiřuje oblast austenitu. Použití manganu a niklu rozšiřuje oblast austenitu a umožní vyšší rozpustnost dusíku.
Uhlík	Uhlík je silně austenitotvorný prvek a zvyšuje pevnostní vlastnosti. Stabilizuje austenit pro deformaci za studena. Nevýhodou však je, že zvyšuje náchylnost k mezikrystalové korozi.
Dusík	Je silně austenitotvorný a zvyšuje pevnost. Od 0,2 % zvyšuje riziko mezikrystalové koroze, proto se používá obvykle do 0,2 %. Stabilizuje austenit pro tváření za studena. S molybdenem zvyšuje odolnost proti bodové korozi.
Křemík	Feritotvorný prvek vyvolávající praskavost svarů. Snižuje odolnost oceli ve vroucí 65 % kyselině dusičné. V množství okolo 3 % procent omezuje náchylnost k mezikrystalové korozi ve vroucí vysoce koncentrované kyselině dusičné.
Molybden	Feritotvorný prvek podporující tvorbu intermediálních fází. Výrazně zvyšuje korozní odolnost ve všech prostředích s výjimkou vroucí kyseliny dusičné. Zvyšuje žárovečnost (nikoli žáruvzdornost).
Měď	Slabě austenitotvorný prvek, který zvyšuje odolnost vůči kyselině sírové. Okolo množství 3 % zlepšuje obrobiteľnost.
Titan, Niob	Karbidotvorné prvky, váží se na uhlík. Potlačují mezikrystalovou korozi a zvyšují žárovečnost. Niob vyvolává praskání svarů.
Síra, Selen, Fosfor, Olovo	Zvyšují obrobiteľnost, ale snižují korozivzdornost.
Bór	Používaný jen ve velmi malých množstvích, jinak způsobuje praskání svarů. Ve velmi malých koncentracích zlepšuje tvářitelnost a žárovečnost.

Pokud upravujeme základní složení austenitické oceli (Cr 18 %, Ni 9 %), pak to děláme za účelem [5]:

- Celkové korozní odolnosti (Cr, Mo, Cu, Si, Ni)
- Odolnosti proti mezikrystalové korozi (Ti, Nb)
- Změny mechanických vlastností (N)
- Změny obrobiteľnosti (S, Se, P, Pb, Cu)
- Odolnosti proti praskavosti svárů (Mn)
- Odolnosti proti bodové a štěrbinové korozi (Mo, Si, N)
- Pevnosti při tečení (Mo, Ti, Nb, B)
- Žárovzdornosti (Cr, Al, Si, Ni, vzácné zeminy)
- Odolnosti proti koroznímu praskání (zmenšení obsahu P, As, Sb, Sn)

Tepelné zpracování austenitických ocelí

Existují tři základní důvody tepelného zpracování austenitických ocelí.

- Získat homogenní tuhý roztok a optimální korozní odolnost rozpuštěním karbidů v austenitu.
- Potlačení zpevnění vyvolané tvářením za studena i za tepla.
- Vyvážit uhlík a dusík na stálé karbidy a nitridy, abychom omezili dlouhodobý tepelný vliv na stabilitu struktury

Ocel se při zpracování nejprve zahřeje na 950 až 1150 °C (dle typu), rychle se ochladí a tak se vyhneme slučování karbidů, tento proces nazýváme rozpouštěcí žíhání. U ocelí s titanem a niobem je třeba ještě využít stabilizačního žíhání po dobu zhruba 3 hodin na teplotě 900 °C.

3.2 Struktura austenitických korozivzdorných ocelí

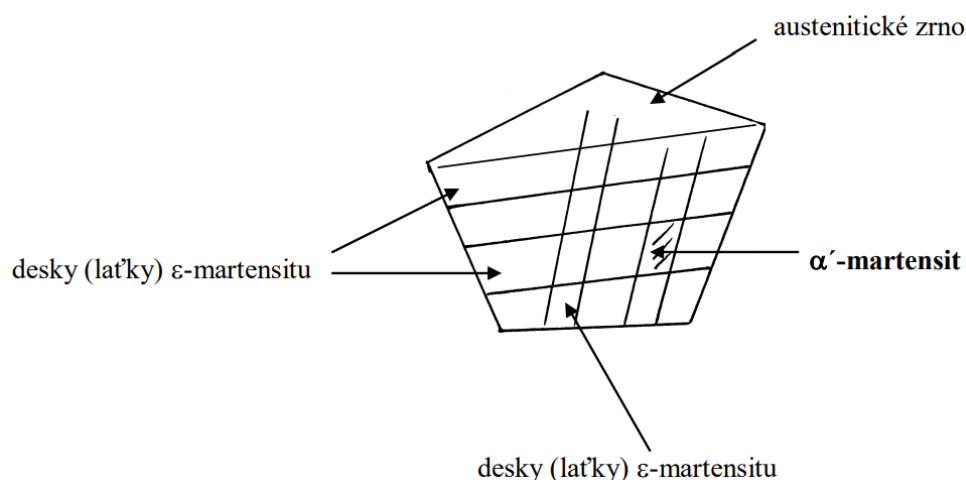
Struktura austenitických korozivzdorných ocelí není pro všechna chemická složení stabilní, může dojít k přeměně austenitu na martenzit. Martenzit je produkt bezdifúzní přeměny ve slitinách na bázi železa.

Austenit může prodělat martenzitickou přeměnu v důsledku:

- poklesu teploty pod teplotu počátku martenzitické přeměny, která je závislá na chemickém složení
- při plastické deformaci materiálu (hovoříme o deformačně indukovaném martenzitu)

V austenitické korozivzdorné oceli s nižším obsahem niklu dochází vlivem tváření za studena k fázové transformaci z kubického plošně centrovaného austenitu na martenzit. Tento martenzit může být tvořen dvěma fázemi, a to martenzitem (ϵ) s těsně uspořádanou hexagonální mřížkou, který je paramagnetický, a martenzitem (α') s prostorově centrovanou krychlovou mřížkou, který je feromagnetický. Při martenzitické transformaci v ocelích zůstává většina atomů uhlíku v tuhém roztoku (α'). Martenzit v ocelích tedy představuje přesycený tuhý roztok uhlíku ve feritu. Základním řídicím mechanismem martenzitické transformace je smyk. Během martenzitické transformace je uspořádání atomů ve výchozí fázi změněno procesem, který připomíná smykovou deformaci, do nových poloh odpovídajících martenzitu. Proto musí dojít k odpovídající makroskopické změně tvaru krystalu, který prochází přeměnou. [8]

Martenzit má odlišný typ krystalové mřížky v porovnání s austenitem, ale jejich chemické složení je stejné. Přeměna mezi těmito dvěma typy struktur vyžaduje velmi malou tepelnou aktivační energii, protože se realizuje bezdifúzním mechanismem. Martenzit má nižší hustotu ve srovnání s austenitem, což má za důsledek změny objemu materiálu.

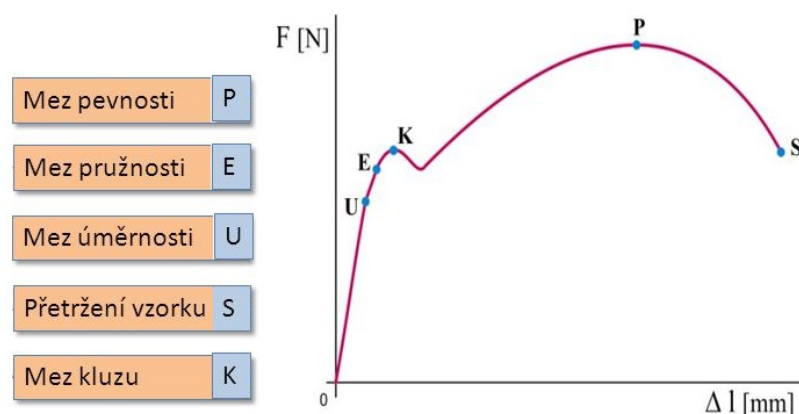


Obrázek 4 – Vznik martenzitu. [8]

Nejdříve dochází k postupné transformaci austenitické struktury na (ϵ) - martenzit, který je přechodovým stádiem transformace austenitu na (α') - martenzit. Proces může probíhat až do úplného vyčerpání plasticity austenitické matrice (rovnoměrné deformace), tedy do úplné transformace austenitu na (ϵ) - martenzit resp. (α') - martenzit. Obě přeměny austenitické oceli vytvrzují. Odstranění magnetismu je možné ohřevem oceli na teplotu přibližně 50 °C nad teplotou A_{c3} (dojde k překrystalizaci), výdrž na teplotě a pomalé ochlazení v peci.

3.3 Tváření korozivzdorné austenitické oceli

Tváření je nedestruktivní technologický proces zpracování materiálu, při kterém dochází ke změně tvaru a mechanických vlastností materiálu. Při tváření kovů je nutno překročit mez pružnosti, ale nesmí být překročena mez pevnosti. Ke tváření jsou vhodné tvárné materiály, tj. takové materiály, které mají tyto meze od sebe dostatečně vzdálené. Tváření dělíme na dva základní typy: za tepla a za studena.



Obrázek 5 – Diagram pevnosti oceli. [3]

Tváření za studena

Cílem tváření za studena u austenitických ocelí je častěji získání požadovaného tvaru než pevnosti. Nicméně zpevnění takto získané je u austenitických ocelí vždy značné a proto se někdy zpětně odstraňuje žiháním. Při tváření za studena, kvůli nízké teplotě, nenastává zotavení ani rekrytalizace, a proto zůstávají krystaly deformovány a rovněž napětí v kluzných rovinách zůstane zachováno. Tím dochází ke zvýšení meze kluzu, pevnosti a tvrdosti, ale klesá houževnatost a tažnost materiálu. Austenitické oceli se dobře hodí pro hloubení tahem, lisování, ražení, prostřihování, ohýbání, lemování, zaválcování a jiné způsoby tváření. Vysoká plasticita těchto ocelí je činí dobrou volbou pro tváření za studena. Oceli s vyšším obsahem niklu (10 % až 12 %) a nižším obsahem uhlíku jsou výhodnější pro tváření z důvodu vyšší stability austenitu. Vzhledem k vysokému zpevnění těchto ocelí při tváření potřebují tvářecí zařízení o 50 % až 100 % vyšší výkon než u uhlíkových ocelí, rychlost tváření je často nižší. Nižší rychlost vede také ke zmenšenému riziku zadření a zahřívání. V závislosti na stupni přetváření je možné dosahovat různých stupňů zpevnění. Při tváření za studena může docházet k doplňkové tvorbě deformačního martenzitu. Pokud mažeme tvářený výrobek nebo součást zařízení, která přijde do styku

s tvářeným výrobkem, použijeme vosk ředěný minerálním olejem, popřípadě mýdlo. V žádném případě nemažeme grafitem, během tváření by přilnul k výrobku. Austenitické oceli lze také tvářet hydraulicky nebo výbuchem.

4 MAGNETICKÉ VLASTNOSTI LÁTEK

Magnetické pole, analogicky jako pole elektrické, je ovlivňováno interakcí s látkou. V atomech (iontech) pevných látek je nositelem magnetického momentu elektronový obal atomového jádra i jádro samo. Magnetický moment jádra je řádově tisíc krát menší než magnetický moment elektronového obalu, to je způsobeno mnohem větším objemem elektronového obalu oproti jádru, částice tak mají v obalu větší prostor k pohybu. Při uspořádávání elementárních nositelů magnetického momentu magnetickým polem se uplatňuje druhá mocnina velikosti každého jednotlivého momentu. Z toho vyplývá, že přínos elektronového obalu k magnetické susceptibilitě je řádově 10^3 krát větší než přínos atomového jádra. Lze proto pro většinu úvah magnetický moment jádra zanedbat. Určujícím faktorem pro magnetické chování látky je elektronový obal jádra.

Existují tři příspěvky elektronového obalu:

- Orbitální moment elektronů (paramagnetismus)
- Spinový moment elektronů (paramagnetismus)
- Změna orbitálního momentu elektronů ve vnějším poli (diamagnetismus)

V plně obsazených elektronových slupkách jsou orbitální a spinové příspěvky momentů vzájemně vykompenzovány (Unsöldův teorém). Na nenulovém magnetickém momentu se mohou podílet tedy pouze elektrony z neúplných elektronových slupek. Vnější valenční elektronové slupky se zpravidla podílejí na vytvoření meziatomové vazby, při které se magnetické momenty vzájemně kompenzují. Nenulový moment budou tedy mít především atomy s neúplnými vnitřními slupkami. Prvky s takovouto strukturou elektronových slupek označujeme jako přechodové a nejvýznamnější z nich se nalézají ve skupině železa a vzácných zemin.

Při určení výsledného magnetického momentu atomu je nutné uvážit, že každý elektron má jistý orbitální moment hybnosti \vec{l} (souvisí s pohybem elektronu v prostoru, je vázán na orbitální moment hybnosti elektronu) a (spinový) magnetický moment hybnosti elektronu \vec{s} (souvisí s vlastním momentem hybnosti elektronu), jež oba přispívají k celkovému momentu hybnosti atomu \vec{J} . Velikost tohoto příspěvku závisí na druhu vazby mezi orbitálním a spinovým momentem. Pro většinu látek vzniká tzv. L – S vazba. Při ní se orbitální momenty všech elektronů daného atomu vektorově sčítají do výslednice $\vec{L} = \sum \vec{l}_i$ a spinové momenty do výslednice $\vec{S} = \sum \vec{s}_i$. Vektorový součet těchto dvou momentů udává celkový moment hybnosti atomu $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$. S orbitálními a spinovými

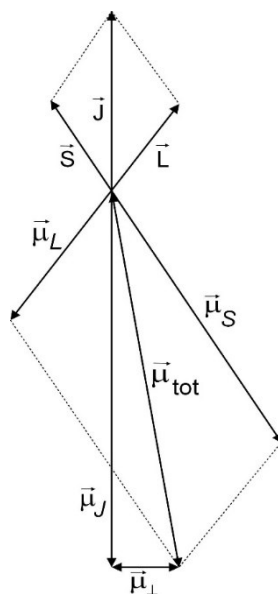
momenty hybnosti elektronů v atomu jsou spojeny antiparalelně orientované magnetické momenty. Uvážíme-li, že v přiblížení L – S vazby se orbitální a spinové momenty hybnosti vektorově sčítají, platí totéž pro magnetické momenty a pro velikosti výsledných magnetických momentů $\vec{\mu}_L$ a $\vec{\mu}_S$ platí:

$$\text{orbitální magnetický moment } \mu_L = \sqrt{L(L+1)} \mu_B, \quad (3)$$

$$\text{spinový magnetický moment } \mu_S = 2\sqrt{S(S+1)} \mu_B, \quad (4)$$

kde μ_B je Bohrov magneton, který představuje kvantum magnetismu a jeho číselná hodnota je $\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \text{ (J} \cdot \text{T}^{-1})$.

Vektorový součet těchto dvou momentů udává celkový magnetický moment atomu $\vec{\mu}_{\text{tot}}$. Celkový magnetický moment $\vec{\mu}_{\text{tot}}$ není kolineární (neleží v jedné přímce) s celkovým momentem hybnosti \vec{J} . Zavádíme proto tzv. efektivní magnetický moment $\vec{\mu}_J$ jako průmět vektoru $\vec{\mu}_{\text{tot}}$ do směru (přesněji protisměru) vektoru \vec{J} (viz obr. 6). [9,10]



Obrázek 6 – magnetický moment atomu. [9,10]

Všechny výsledné momenty jsou kvantovány. Obsazení jednotlivých stavů atomu elektrony, které je popsáno kvantovými čísly (n, l, m, s) se řídí Pauliho principem a skládání jejich momentů hybnosti Hundovými pravidly. Protože zaplněné elektronové slupky mají momenty vykompenzovány, jejich příspěvek k magnetickému momentu je nulový. Pro obsazení neúplných slupek pak Hundova pravidla stanovují:

- Pro danou elektronovou konfiguraci má nejnižší energii člen s nejvyšší multiplicitou, tedy i s maximální velikostí celkového spinu.
- Při dané multiplicitě má nejnižší energii konfigurace s maximální velikostí orbitálního momentu hybnosti, tedy s maximální hodnotou orbitálního kvantového čísla.
- Je-li slupka zaplněna méně než z poloviny, nabývá v základním stavu hodnota celkového momentu hybnosti minimální hodnoty $J = L - S$. Je-li valenční slupka zaplněna více jak z půlky, nabývá hodnoty maximální $J = L + S$.

Vliv magnetického pole na látkové prostředí popisujeme obecně vektorem magnetizace \vec{M} , který je funkcí intenzity působícího magnetického pole \vec{H} , teploty T a času t . Jak vyplývá z Lorentzovy mikroskopické teorie elektromagnetického pole, má vektor magnetizace význam střední makroskopické hustoty magnetického dipólového momentu. Dle chování materiálů v magnetickém poli, je můžeme rozdělit do tří základních kategorií: diamagnetické, paramagnetické a feromagnetické materiály. Pro popis chování materiálu v magnetickém poli je zavedena magnetizace \vec{M} , která představuje součet všech magnetických momentů všech přítomných atomů připadající na objem materiálu V :

$$\vec{M} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{\mu}_i}{V}, \quad (5)$$

kde index i označuje sčítání přes všechny momenty v látce.

Mírou odezvy materiálu na magnetické pole je magnetická susceptibilita χ_m , zavedená,

$$\vec{M} = \chi_m \cdot \vec{H} \quad (6)$$

kde magnetizace i intenzita magnetického pole \vec{H} jsou dosazeny ve stejných jednotkách (v SI soustavě se udávají v $A \cdot m^{-1}$). Magnetická susceptibilita je bezrozměrná veličina.

Podle hodnoty magnetické susceptibility lze rozdělit materiály na:

- diamagnetické: $-1 < \chi_m < 0$
- paramagnetické: $0 < \chi_m \ll 1$
- feromagnetické: $\chi_m \gg 1$ [11,12,13]

Prostřednictvím magnetické susceptibility lze v lineárním magnetiku vyjádřit magnetickou indukci \vec{B} jako:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \cdot \vec{H} + \mu_0 \cdot \vec{M} \quad (7)$$

dosazením za magnetizaci z rovnice (6) dostaneme vztah:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \mu_0 \cdot \chi_m \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot \vec{H} \cdot (1 + \chi_m) = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} = \mu \cdot \vec{H}, \quad (8)$$

$$\text{kde } \mu \text{ je permeabilita, } \mu = \mu_0 \cdot \mu_r, \quad (9)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua ($\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$) a μ_r je relativní permeabilita daného materiálu $\mu_r = 1 + \chi_m$. (10)

Relativní permeabilita je bezrozměrná veličina. Dle relativní permeability rozdělujeme materiály na:

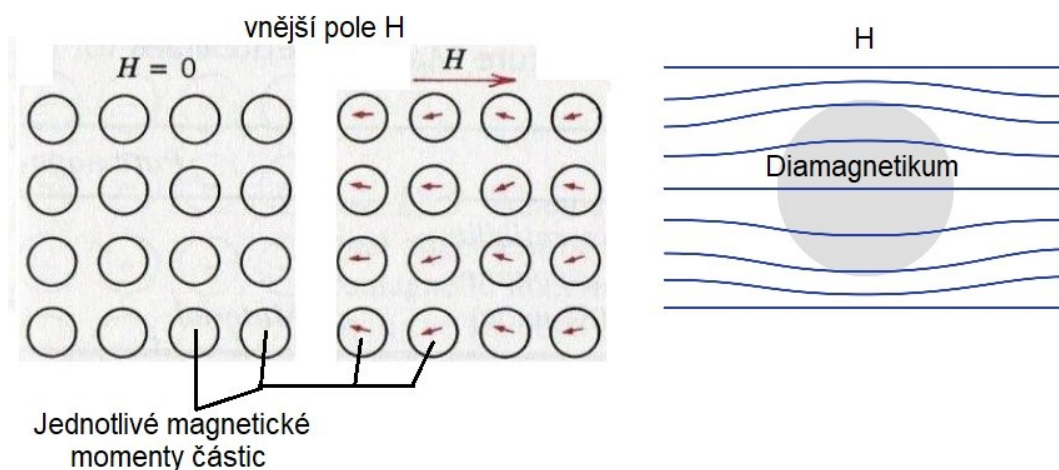
- $\mu_r < 1$: materiály diamagnetické
- $\mu_r > 1$: materiály paramagnetické
- $\mu_r \gg 1$: materiály feromagnetické

[11,12,13]

4.1 Diamagnetismus

Diamagnetismus poprvé pozoroval Sebald Justinus Brugmans na antimonu a bismutu v roce 1778. V roce 1845 prokázal Michael Faraday, že se jedná o vlastnost materiálu, která se projeví při vložení materiálů do vnějšího magnetického pole.

Diamagnetismus je vyvolán snahou elektrických nábojů odstínit vnitřek tělesa od vnějšího magnetického pole. Vytvoří se indukovaný proud elektronové dráhy. Indukovaný proud elektronové dráhy v atomu přetrvává dokud je přítomno vnější magnetické pole. Pole vytvořeno touto indukcí má směr opačný ke vnějšímu magnetickému poli. Diamagnetismus vykazují látky, jejichž atomy mají celkový magnetický moment nulový, tzn. že orbitální a spinové příspěvky momentů elektronového obalu jádra atomu jsou vzájemně vykompenzovány. Magnetický moment se objevuje zapojením vnějšího magnetického pole. Při normálních teplotách se hodnota χ_m pohybuje v rozmezí od -10^{-1} do -10^{-4} .



Obrázek 7 – Diamagnetikum.

Pro popis diamagnetismu se využívá Larmorův teorém. Pohyb elektronů okolo jádra atomu je u diamagnetika stejný s vnějším polem i bez něj, až na precesní pohyb vnějším polem

vyvolaný. Tento precesní pohyb je konán s Larmorovou frekvencí ω_L . Moment hybnosti a spolu s ním i magnetický moment elektronu rotuje s úhlovou rychlostí ω_L kolem směru \vec{B} .

$$\omega_L = \frac{e \cdot B}{2 \cdot m_e}, \quad [19] \quad (11)$$

kde e je náboj elektronu a m_e je hmotnost elektronu.

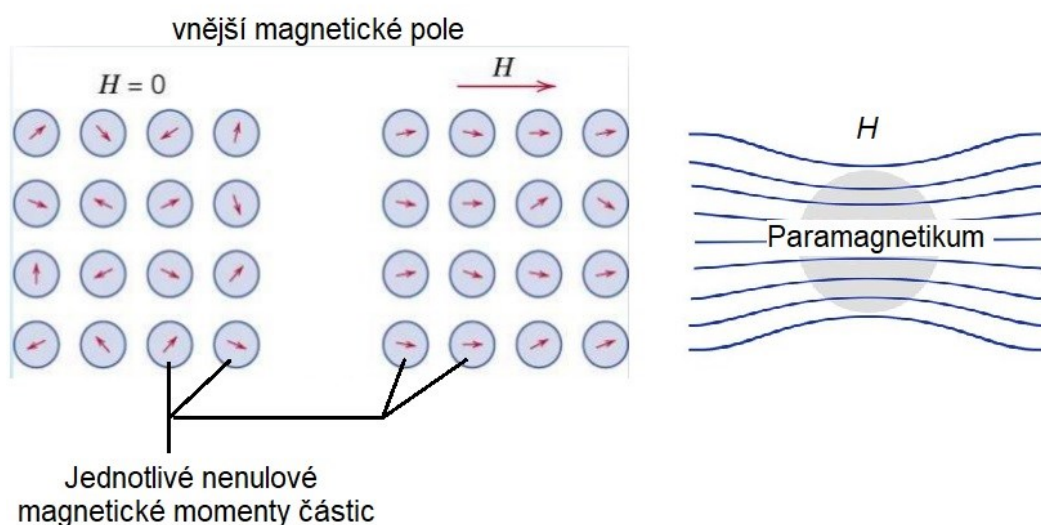
Je-li průměrný elektronový proud kolem jádra nulový, přiložené vnější magnetické pole vybudí proud konečný. Larmorova precese n elektronů je poté ekvivalentní elektrickému proudu I .

$$I = (-n \cdot e) \cdot \left(\frac{1}{2\pi} \cdot \omega_L\right) \quad [19] \quad (12)$$

Tímto způsobem můžeme popsat diamagnetismus u nevodivostních elektronů. Uvedené vztahy z experimentů nejlépe vycházejí pro vzácné plyny.

4.2 Paramagnetismus

Není zcela jasné, kdo paramagnetismus poprvé objevil, ale pravděpodobně to byl Michael Faraday. Podobně jako diamagnetismus i paramagnetismus je vlastnost materiálu, která se projevuje po vložení do vnějšího magnetického pole. Paramagnetismus vykazují látky, jejichž atomy mají nenulový magnetický moment, přičemž vzájemná interakce těchto momentů je zanedbatelná. Výsledný magnetický moment paramagnetika se orientuje ve směru vnějšího magnetického pole. Paramagnetika jsou magnetickými poli slabě přitahována.



Obrázek 8 – Paramagnetikum.

U těchto látek existuje orientační účinek pole na magnetický moment. Proti tomu působí tepelný pohyb, který má naopak desorientující účinek. Za předpokladu tepelné rovnováhy přibližně platí:

$$\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} \approx k \cdot T \text{ a } \vec{M} \approx n \cdot \mu_m \quad [19] \quad (13)$$

Pozn. μ_m je magnetický moment, je k Boltzmannova konstanta, n je hlavní kvantové číslo. Magnetickou susceptibilitu lze poté odhadnout podle vztahu:

$$\chi_m = \frac{M}{H} \approx \frac{n \cdot \mu_0 \cdot \mu^2}{k \cdot T} \rightarrow \chi_m \sim \frac{1}{T} \quad [19] \quad (14)$$

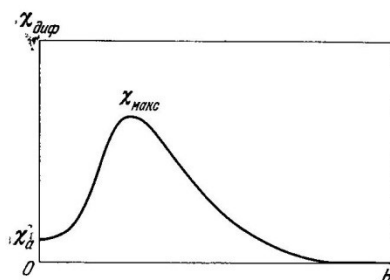
Paramagnetismus je jev silnější než diamagnetismus, příspěvek k magnetickému momentu spinů a orbitalů elektronů je výraznější než příspěvek změny dráhy elektronu vlivem vnějšího pole. Většina látek nacházejících se v přírodě je paramagnetická. [9]

Paramagnetické látky se liší od diamagnetických nejen velikostí a znaménkem susceptibility, nýbrž i závislosti susceptibility na teplotě. Jak experimentálně zjistil P. Curie, je paramagnetická susceptibilita nepřímo úměrná absolutní teplotě látky.

4.3 Feromagnetismus

Feromagnetismus je jev, při kterém některé látky mohou vytvořit permanentní magnety. Feromagnetismus je nejsilnější magnetický jev a obvykle jediný, jehož působení můžeme pocítit. Permanentní magnety, které mohou být zmagnetizovány vnějším magnetickým polem, jsou tvořeny látkami feromagnetickými, či ve vzácnějších případech látkami feritickými.

Mezi prvními pracemi věnujícímu se feromagnetismu je práce od Aleksandra Stoletova, jež mimo jiné poukázala na závislost mezi permeabilitou (popř. magnetickou susceptibilitou) a vloženým magnetickým polem. Tato závislost se nazývá Stoletova křivka.



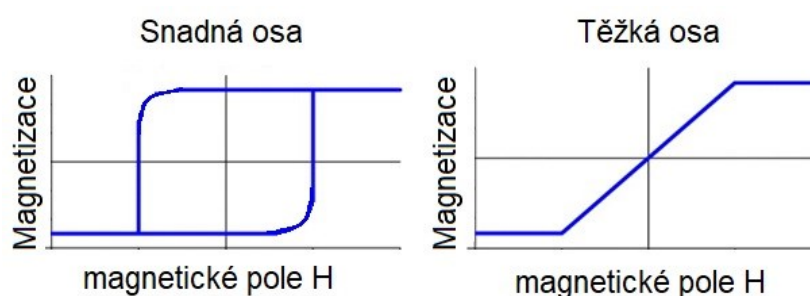
Obrázek 9 – Stoletova křivka železa z r. 1871, univerzita Heidelberg . [10]

Jedním z charakteristických rysů feromagnetik je existence spontánní magnetizace, tj. existence nenulové magnetizace i bez přítomnosti vnějšího magnetického pole. Z teorie elektromagnetického pole je známo, že soustava dvou magnetických dipólů má minimální energii tehdy, jsou-li jejich momenty orientované souhlasně podél jejich spojnice. Je-li tato vzájemná interakce silná tak, aby převládla nad vlivem tepelného pohybu dipólu, který toto uspořádání narušuje, bude vykázaná nenulová magnetizace i bez přítomnosti vnějšího pole.

V roce 1907 předložil P. Weiss teorii feromagnetismu, která předpokládala, že feromagnetický materiál obsahuje určitý počet domén, které jsou spontánně (samovolně) zmagnetizovány. Celková velikost spontánní magnetizace materiálu je dána součtem magnetických momentů všech domén. Spontánní magnetizace je podle této teorie projevem vzájemné interakce atomových dipólů uvnitř jedné domény.

Feromagnetismus není závislý pouze na chemickém složení látky, ale i na její krystalické struktuře. To je patrné, když zvážíme, že existují feromagnetické slitiny, jejichž složky samy feromagnetické nejsou, tyto slitiny se nazývají Heuslerovy (např. slitina CuMnAl). Také je možné za rapidního ochlazení vytvořit amorfni feromagnetikum, takové feromagnetikum je téměř izotropní, protože ztratí závislost na osách krystalové struktury. Feromagnetika jsou obvykle anizotropní (jejich magnetické vlastnosti nejsou stejné ve všech směrech).

Osa, ve které proběhne magnetizace feromagnetika nejsnáze, se nazývá, snadná magnetizační osa. Rozdíl v magnetizaci na snadné ose a mimo ni bývá značný.



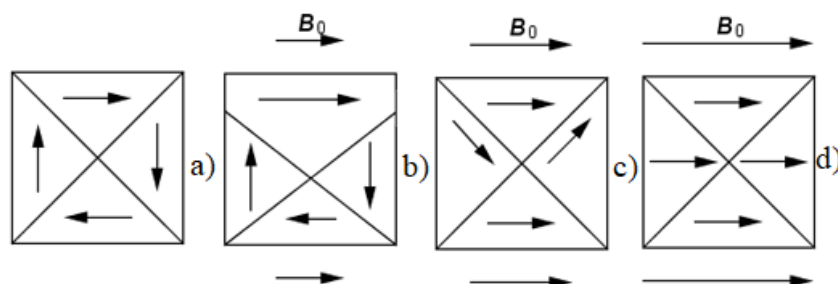
Obrázek 10 – Osy magnetizace.

Feromagnetismus může nastat pouze tam, kde jsou pouze částečně zaplněné elektronové obaly atomů, v opačném případě by se přírůstky magnetických momentů jednotlivých elektronů vyrušili. Toto tvrzení je však pravdou i pro paramagnetismus, ve feromagnetismu však navíc platí, že dochází k samovolnému magnetování momentů v oblastech zvaných Weissovy domény (popř. jen domény). Aby mohly domény

vzniknout, je nezbytné, aby atomy s nepárovými elektrony tyto elektrony sdílely, tento jev se nazývá výměnná interakce.

Výměnná interakce ovlivňuje polohy elektronů a vzniká energetický rozdíl, který o několik řádu převyšuje energii, jež by se v obalu vyskytovala, kdyby k tomuto jevu nedošlo. Obdoby těchto interakcí vytváří antiferomagnetické a ferimagnetické látky. Výměnná interakce byla objevena v roce 1926 fyziky Wernerem Heisebergem a Paulem Diracem. Jestliže výměnná interakce nám způsobí několika řádový rozdíl samovolnou magnetizací, mohli bychom se domnívat, že i za normálních podmínek mají feromagnetika silná magnetická pole. Taková domněnka by však byla zcela chybná. I feromagnetika, se bez vložení do magnetického pole nebo magnetizačního procesu, chovají magneticky neutrálně. Na vině za tento fakt jsou opět Weissovy domény, ty jsou velice malé a jejichž uspořádání je náhodné, proto se jejich magnetická pole vruší.

Když začneme aplikovat vnější magnetické pole, domény s podobnou orientací se zvětšují, a když se pole zvětší dále, i domény s rozdílnou orientací se začínají orientovat ve směru vloženého magnetického pole (viz obr. 11).



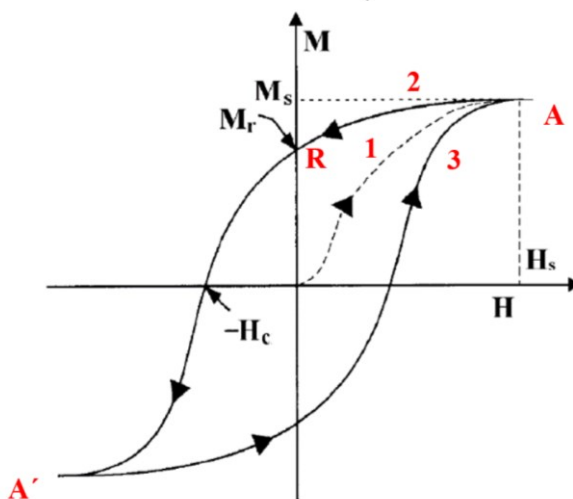
Obrázek 11 – Schématické znázornění Weissových domén a) bez působení vnějšího magnetického pole b) ve slabém vnějším poli c) v silném vnějším poli d) ve stavu nasycení. [12]

Teplota snižuje magnetické schopnosti feromagnetik, antiferomagnetik a ferimagnetik. Zahřejeme-li feromagnetikum nad určitou teplotu, tzv. Curierův bod, ztrácí skokem vlastnosti feromagnetika a stává se z něho paramagnetikum. Magnetické vlastnosti feromagnetik se znatelně zhoršují již při dosažení 40 % Curieovy teploty T_c . Curieova teplota železa je 1043 K, 40 % z této teploty je přibližně 420 K, tj. 147 °C.

Základními feromagnetickými prvky jsou železo Fe, kobalt Co, nikl Ni a gadolinium Gd. Relativní permeabilita feromagnetických látek je velká 10^2 až 10^5 . Jejich vliv na magnetická pole je tedy sto až stotisíc násobně větší než u diamagnetik a paramagnetik. [11,12,13]

4.4 Magnetizační křivka

Magnetizace v závislosti na vnějším magnetickém poli feromagnetického materiálu vykazuje hysterezní chování a tuto závislost můžeme pozorovat v hysterezní (magnetizační) křivce feromagnetika (viz obr. 12). Tuto křivku může představovat závislost magnetické indukce feromagnetického materiálu (\vec{B}) na hodnotě intenzity vnějšího magnetického pole (\vec{H}), B–H křivka, nebo také závislost magnetizace indukované uvnitř materiálu (\vec{M}) na hodnotě intenzity vnějšího magnetického pole (\vec{H}), M – H křivka.



Obrázek 12 – Magnetizační křivka feromagnetika.

Významnými body na této křivce jsou: magnetizace v nasycení (M_s), zbytková (remanentní) magnetizace (M_r) a koercitivní pole (H_c). Magnetujeme-li dosud nemagnetované feromagnetikum, probíhá závislost po křivce (1) prvotní magnetizace (panenská křivka). Magnetická susceptibilita feromagnetika, která je dána směrnicí ke křivce (1) je proměnná. V bodě (A) nastává stav nasycení – tzn., že při zvyšování intenzity vnějšího magnetického pole nenarůstá magnetizace materiálu. Tento bod označujeme jako magnetizaci v nasycení (M_s). Nasycený stav materiálu je takový stav, kdy všechny magnetické momenty jsou natočeny do směru vnějšího magnetického pole. Budeme-li od tohoto bodu intenzitu vnějšího magnetického pole snižovat, nebude se magnetizace zmenšovat podle křivky (1), nýbrž v důsledku magnetické hystereze (zpoždování) podle křivky (2). V Bodě (R), ve kterém je hodnota intenzity vnějšího magnetického pole nulová, si látka drží magnetizaci, která se nazývá remanentní (zbytková) magnetizace (M_r). K tomu, aby remanence zanikla (zbytková magnetizace

klesla na nulu), je nutno změnit směr intenzity magnetického pole tak, aby dosáhla hodnoty (H_c). Vzorek bude demagnetován. Intenzitu magnetického pole v opačném směru, která způsobila celkovou demagnetizaci materiálu, nazýváme koercitivní intenzita (H_c), nebo také koercitivní pole. Zvětšujeme - li dále velikost intenzity vnějšího magnetického pole s opačnou orientací, dojde k přemagnetování feromagnetika. V bodě (A') symetrickém k bodu (A) nastává nasycení v opačné orientaci. Při zvětšování intenzity magnetického pole od tohoto bodu se magnetizace bude měnit podle křivky (3). Plocha uzavřené hysterezní smyčky je číselně rovna energii spotřebované na jeden magnetizační oběh v objemové jednotce feromagnetika. Tato energie se přemění na teplo.

Podle velikosti koercitivního pole rozeznáváme magneticky tvrdá a magneticky měkká feromagnetika. Magneticky tvrdá feromagnetika vykazují vysokou hodnotu zbytkového magnetismu, tedy vysoké koercitivní pole jejich hysterezní smyčka je široká. Do této skupiny patří např. kobaltová, wolframová a chromová ocel, tvrdé ferity. Magneticky měkká feromagnetika po odstranění vnějšího magnetického pole snadno ztrácejí magnetické vlastnosti, mají malé koercitivní pole, úzkou hysterezní smyčku.

Obě zmíněné skupiny materiálů nalezly široké využití v technické praxi. Měkká feromagnetika jsou využívána například pro obvody se střídavým proudem (při každém přemagnetování se přeměňuje jen malá energie na teplo) nebo jádra cívek v transformátorech elektrického napětí. Tvrdá feromagnetika jsou vhodná např. jako záznamová média a k výrobě permanentních magnetů, neboť k jejich odmagnetování je nutné silné opačně orientované vnější magnetické pole.

4.5 Magnetické vlastnosti austenitických korozivzdorných ocelí

Magnetické chování jednotlivých druhů korozivzdorných ocelí se značně liší, od paramagnetického (nemagnetického) v plně austenitických strukturách až po feromagnetické chování v kalených martenzitických strukturách. Existují však aplikace, kdy magnetické nebo paramagnetické chování těchto ocelí může významně ovlivnit výrobu a použití.

Korozivzdorné feritické, martenzitické oceli a oceli přechodové skupiny s dvoufázovou strukturou jsou obvykle klasifikovány jako magnetické. Všechny austenitické nerezové oceli jsou paramagnetické (nemagnetické). To je způsobené minimálně 8 % niklu a 17 až 20 % chromu. Při magnetickém poli 200 Oersted ($16 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$) se magnetická permeabilita pohybuje od 1,003 do 1,005. Hodnoty relativní permeability

ocelí (které jsou klasifikovány jako feromagnetické) jsou obvykle vysoké s hodnotami okolo 14. Vyšší hodnoty permeability jsou spojeny s množstvím feritických nebo martenzitických fází, které austenitická ocel obsahuje, a je tedy závislá na: chemickém složení, tváření za studena a tepelném zpracování. Permeabilita se zvyšuje při tváření za studena v důsledku transformace austenitu na martenzit – feromagnetické fáze. U některých typů austenitických ocelí může být zvětšení magnetické permeability značné. Náchylnost austenitické struktury k feromagnetickému chování po tváření za studena závisí na stabilitě austenitu, která naopak závisí na chemickém složení a homogenitě.

Magnetická permeabilita dosažitelná u austenitických korozivzdorných ocelí je velmi nízká ve srovnání s běžnými magnetickými materiály. Použití těchto ocelí např. pro kryty a zařízení určené pro detekci magnetického pole, pro bezpečnostní, měřicí a kontrolní účely, vyžadují, aby byla ocel paramagnetická. To proto, že přítomnost dokonce slabých feromagnetických částí může negativně ovlivnit jejich výkon. [4]

5 METODIKA EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ

Příprava zkušebních vzorků z korozivzdorných austenitických ocelí:

- Zkušební vzorky netvářené (po zakoupení, plech o tloušťce 2 mm)
- Tváření metodou DRECE
- Tváření ohybem dle ČSN EN ISO 7438:2016 (\varnothing trnu: 10 mm, 20 mm, 30 mm)
- Žíhání vzorků ve vakuové peci na teplotu 950 °C po dobu 30 minut (po tváření metodou DRECE)



Obrázek 13 – Řezání oceli kapalinovým paprskem.

Experimentální zkoušky prováděné na korozivzdorných austenitických ocelích před a po tváření za studena:

- Chemická analýza povrchu ocelí (SEM, elektronový analyzátor FEI Quanta 650, EDX)
- Měření hmotnosti vzorků ocelí (analytické váhy značky VIBRA HTR-220CE)
- Měření magnetizačních hysterezních křivek ocelí (vibrační magnetometr EV9 VSM firmy MicroSense)
- Mössbauerova spektroskopie s detekcí zpětně rozptýleného gama záření γ -BMS
- Metalografický rozbor struktury ocelí (mikroskop NEOPHOT32)
- Měření mikrotvrdosti na příčném řezu ocelí (mikrotvrdoměr LECO AMH 2000)

6 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ Z KOROZIVZDORNÉ AUSTENITICKÉ OCELI

6.1 Typy zkoumaných ocelí

Pro zkoumání struktury a magnetických vlastností byly vybrány tři typy korozivzdorných austenitických ocelí, které se navzájem liší především v množství uhlíku, chromu, niklu a molybdenu.

Tabulka 3 – Označení testovaných ocelí.

Německo W.-Nr.	USA ASTM, AISI	Německo DIN	Česká republika ČSN
1.4307	304L	X2CrNi 18-9	17249
1.4404	316L	X2CrNiMo 18-10-2	17349
1.4845	310S	X12CrNi 25-21	17255

Tabulka 4 – Hmotnostní chemické složení legujících prvků měřených ocelí (materiálové listy).

Ocel	C (%)	Cr (%)	Mn (%)	Mo (%)	N (%)	Ni (%)	P (%)	S (%)	Si (%)
1.4307	0,016	17,635	1,637	0	0,086	8,015	0,033	0,002	0,361
1.4404	0,022	17,200	1,380	2,040	0,049	10,000	0,034	0,001	0,550
1.4845	0,044	24,550	1,347	0	0,028	19,150	0,028	0,002	0,439

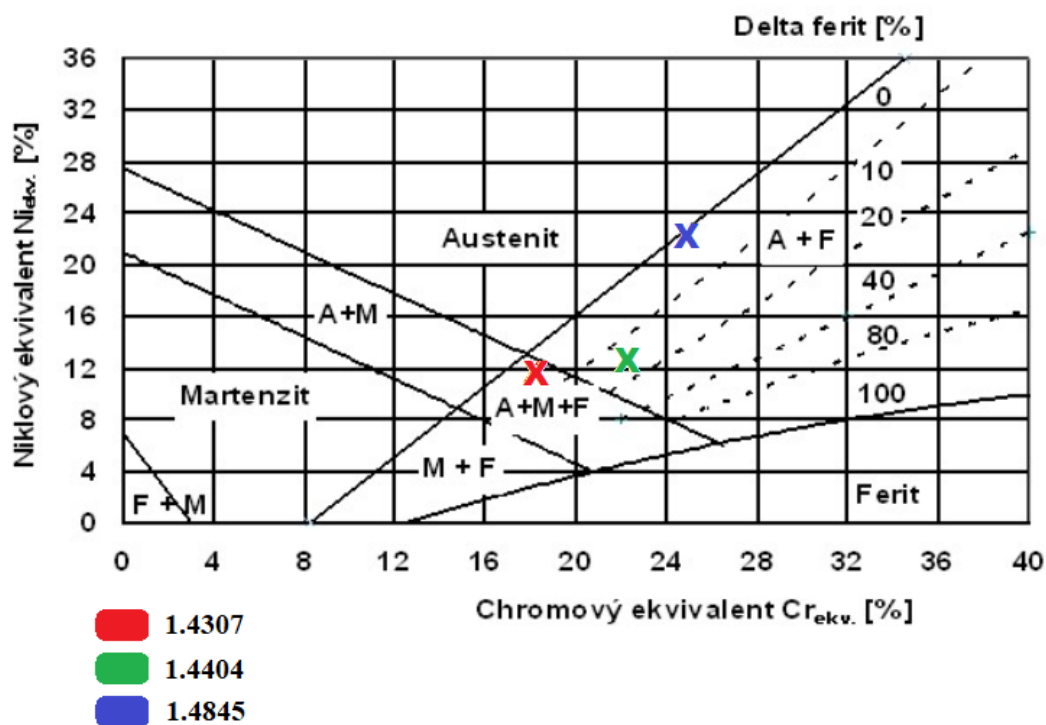
Výpočet ekvivalentů feritotvorných a austenitotvorných prvků pro znázornění přibližné struktury oceli v Schaefflerově diagramu.

Niklový ekvivalent je dán vztahem: $Ni_{ekv} = Ni + 0,5 \cdot Mn + 30 \cdot C + 30 \cdot N$

Chromový ekvivalent je dán vztahem: $Cr_{ekv} = Cr + 2 \cdot Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb + 0,5Ti$

Tabulka 5 – Vypočtené ekvivalenty Ni_{ekv} a Cr_{ekv} pro jednotlivé typy ocelí.

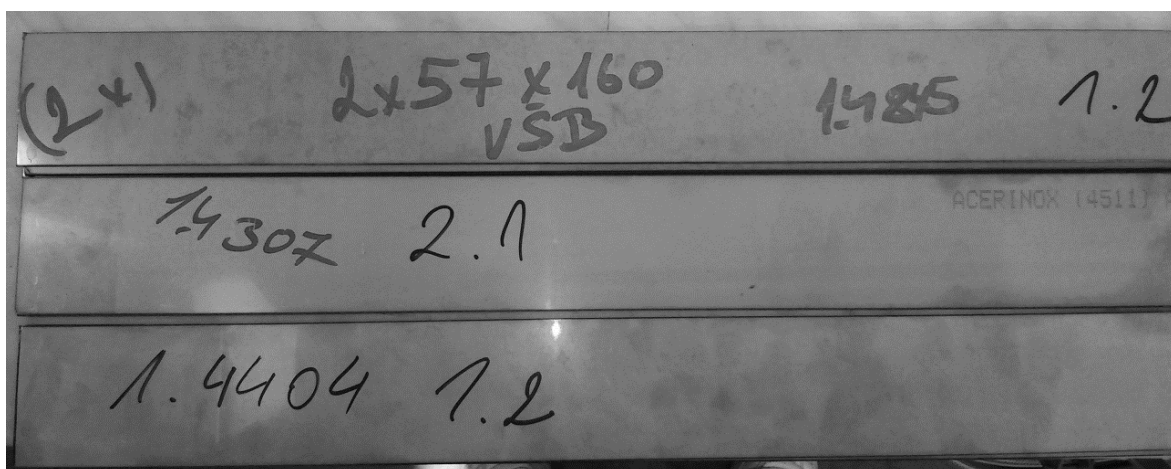
Typ oceli	Ni_{ekv} (%)	Cr_{ekv} (%)	$\frac{Ni}{Cr}$
1.4307	11,91	18,18	0,4545
1.4404	12,82	22,11	0,5814
1.4845	21,99	25,21	0,7800



Obrázek 14 – Pozice testovaných ocelí v Schaefflerově diagramu.

Pro tváření korozivzdorných austenitických ocelí byly dodány vzorky třech výše uvedených jakostí ocelí o rozměrech 58 mm×1000 mm×2 mm (šířka×délka×tloušťka). Povrch vzorků nebyl před tvářením upraven.

Experimentální vzorky pro měření magnetizačních křivek byly připraveny dělením korozivzdorných austenitických ocelí vysokotlakým kapalinovým paprskem s abrazivem na velikost vzorku 5 mm×5 mm×2 mm. Tato metoda byla zvolena z důvodu toho, že zde nedochází k nežádoucímu lokálnímu tepelnému zpracování materiálu a ke změně chemického složení materiálu.



Obrázek 15 – Dodané plechy korozivzdorných austenitických ocelí.

Tabulka 6 – Použití korozivzdorných ocelí. [14]

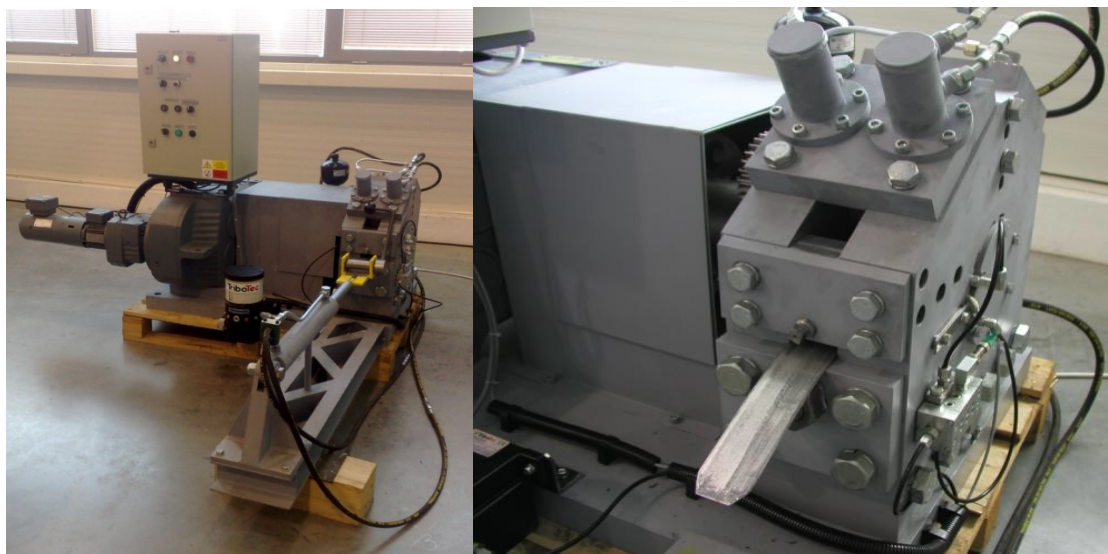
Ocel	Použití
1.4307 (AISI 304L, ČSN 17249), chrom niklová austenitická X2CrNi 18-9	Ocel s nízkým obsahem uhlíku, vhodná k hlubokému tažení, dobře svařitelná a je určena pro použití při velmi nízkých nebo zvýšených teplotách do 350 °C, vhodná pro leštění na vysoký lesk, při tváření se zpevňuje. Ocel je odolná proti korozi ve vodě, vodní páře, slabým organickým i anorganickým kyselinám. Není vhodná pro přímořské oblasti. Používá se v potravinářském průmyslu, chemickém průmyslu i ve farmaceutickém a kosmetickém průmyslu, v architektuře a designu, v oblasti konstrukce motorových vozidel, pro zdravotnická zařízení včetně chirurgických nástrojů, pro výrobu uměleckých předmětů a šperků, pro výrobu kuchyňských spotřebičů. Relativní magnetická permeabilita max. 1,021. [14]
1.4404 (AISI 316L, ČSN 17349), chrom niklová austenitická X2CrNiMo 17-12-2	Ocel se zvýšenou odolností proti všem typům koroze, kromě mírnému sklonu k důlkové korozi způsobené pnutím v roztocích chlóru. Odolná proti kyselinám jak organickým, tak i anorganickým (kyselina sírová, fosforečná). Je velmi dobře svařitelná a leštitelná. Ocel si i po svařování zachovává svou odolnost proti mezikrystalové korozi, vyznačuje se velice dobrými mechanickými vlastnostmi při lisování, ohýbání a tažení. Tato ocel se často používá v chemickém průmyslu, v zařízeních pro styk s mořskou vodou. Je také vhodná pro chirurgické nástroje a zařízení: kanyly, svorky, kleště, držáky, odsávací trubice, průchody šlachou, šrouby, destičky pro kosti, dočasné fixace. Relativní magnetická permeabilita max. 1,02. [14]
1.4845 (AISI 310S, ČSN 17255), chrom niklová austenitická X12CrNi 25-21	Ocel odolná proti oxidaci za zvýšených teplot na vzduchu do 1100 °C, v oxidujícím prostředí s obsahem síry do 1050 °C, v redukčním prostředí s obsahem síry do 650 °C, v prostředí bohatém na dusík s nízkým obsahem O ₂ do 1000 °C, v prostředí s plynným oxidem uhlíku do 900 °C. Při dlouhé expozici v intervalu teplot 650 až 900 °C podléhá křehnutí, a proto je zvláště doporučována pro aplikace nad 900 °C. Dobře svařitelná, obrobitelnost obtížná. Vhodná pro ohýbání za studena, ale značně se zpevňují zpevňování. Vhodná na vysoce tepelně namáhané součásti, pro pouzdra termočlánků. Ocel je nemagnetická. Relativní magnetická permeabilita max. 1,008. [14]

Tabulka 7 – Mez pevnosti v tahu R_m a mez kluzu v tahu $R_p 0,2$ vybraných ocelí (materiálové listy).

Typ oceli	R_m (MPa)	$R_p 0,2$ (MPa)
1.4307	540	230
1.4404	612	308
1.4845	554	243

6.2 Metoda tváření DRECE

Na Katedře mechanické technologie, Fakultě strojní, VŠB-TU Ostrava bylo ve spolupráci s VÚHŽ Dobrá a.s. uvedeno do provozu prototypové tvářecí zařízení využívající metodu DRECE (Dual Rolling Equal Channel Extrusion) pro tváření pásu plechu a tyčí (drátů) kruhového průřezu. Tváření materiálu procesem DRECE využívá intenzivní plastické deformace, kdy tento proces vychází ze spojení dvou používaných technologií ECAP a CONFORM. Zařízení se osvědčilo jak u neželezných slitin (slitiny Al, Cu), tak i ocelových plechů.



Obrázek 16 – Vlevo celé zařízení DRECE, vpravo hlavní tlaková část.

Pásky plechu z oceli jsou postupně protlačeny zařízením DRECE. Protlačit plech metodou DRECE je obvykle možné (záleží na zpevnění) více než jednou. Ve finální fázi je pás plechu vytažen ze zařízení pomocí speciální čelisti ovládané hydraulickým válcem. Mezi jednotlivými průchody je plech vždy otočen o 180°. Tím je docíleno vytvoření rovnoměrné struktury v materiálu. Protlačení probíhá za pokojové teploty. Pásky plechu nebyly tepelně zpracovány ani před samotným protlačením ani v jeho průběhu.

Nově vyvinuté tvářecí zařízení je složeno z těchto hlavních částí:

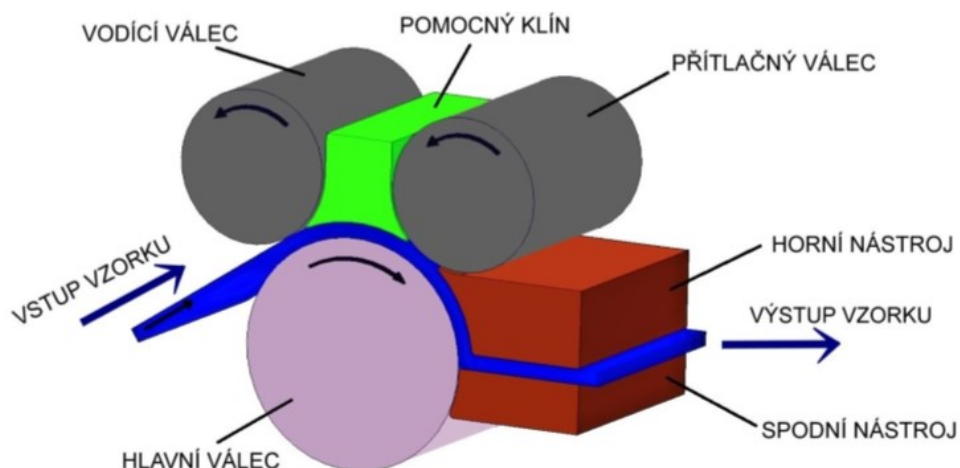
- Převodovka typu Nord
- Elektromotor s frekvenčním měničem rychlosti, který nám dává možnost měnit deformační rychlost i v průběhu procesu a umožňuje tak pružně reagovat na vývoj procesu
- Lamelová spojka
- Podávací (hnací) válec
- Dva přítlačné válce s regulací přítlačné síly
 - Přítlačný válec, který je regulován pomocí dvojice hydraulických válců
 - Vodící válec, který je regulován mechanicky – pro plech
 - Vodící válec, který je regulován pomocí dvojice hydraulických válců – drát
- Spodní a horní tvářecí nástroj z oceli typu Dievar

Tabulka 8 – Technické parametry tvářecího zařízení. [15, 16]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr podávacího (hnacího) válce	198	(mm)
Průměr předního přítlačného válce	118	(mm)
Tlak předního přítlačného válce	0 - 30	(MPa)
Průměr zadního přítlačného válce	118	(mm)
Utahovací moment vodícího válce - tváření plechu	0 - 200	(N·m)
Tlak vodícího válce - tváření drátu	0 - 30	(MPa)
Maximální úhlová rychlost hnacího kola	0,03	(rad·s ⁻¹)
Rychlost protlačování	0 - 3	(mm·s ⁻¹)
Lubrikant	GLEIT - μ® HP 515	
Materiál nástroje	DIEVAR	
Materiál válců	Ocel 12 080	

Tvářecí proces metodou DRECE je založen na technologii protlačování s nulovou změnou rozměrů příčného průřezu s konečným cílem dosažení vysokého stupně deformace ve tvářeném materiálu. Pomocí vícenásobné plastické deformace materiálu je dosaženo podstatného zjemnění struktury materiálu.

K experimentálním účelům se do zařízení pro protlačování pásu plechu vkládá vzorek plechu o rozměrech 58 mm×2 mm×1000 mm (šířka (b) × tloušťka (t) × délka (l)). Je však možné používat i plechy o menší tloušťce, kdy se přizpůsobí rozteč deformační zóny pomocí distančních podložek umístěných pod přítlačnými válci. Za pomoci hlavního a vodícího válce a v součinnosti s přítlačným válcem jsou tyto vzorky protlačovány tvářecím nástrojem. Tato metoda je vyvíjena za účelem komerčního použití s předpokladem, že tvářený materiál bude do zařízení zasouván pomocí podávacích válců či podávacího zařízení ze svitku plechu.



Obrázek 17 – Princip metody DRECE pro protlačování pásu plechu. [15]

Při procesu nedochází ke změně příčného průřezu. Při takto prováděném procesu docílíme podstatného zvýšení mechanických vlastností. Austenitické korozivzdorné oceli byly z důvodu značného zpevnění protlačovány tvářecím nástrojem jen jednou. [15,16,17]



Obrázek 18 – Ocel po tváření DRECE.

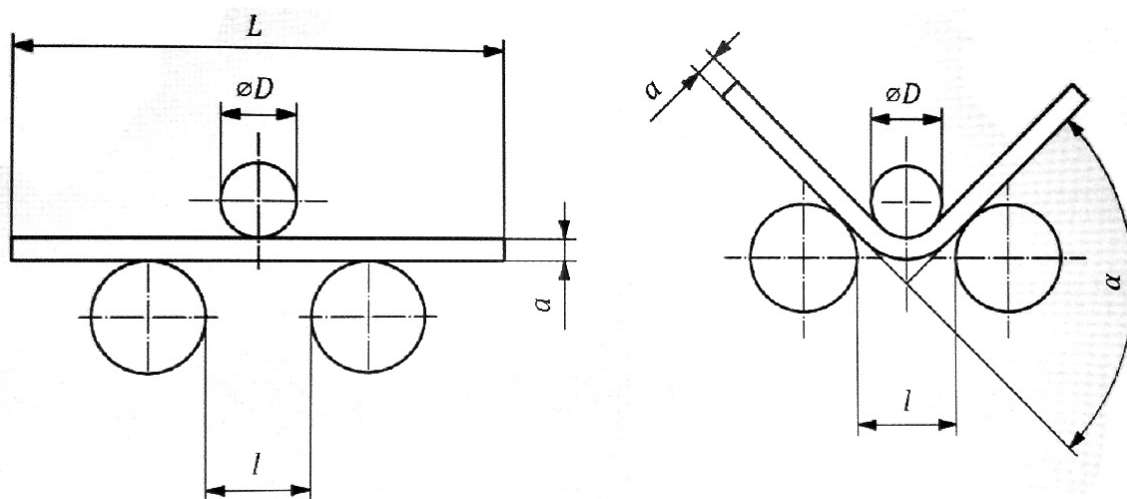
6.3 Metoda tváření ohybem dle normy ČSN EN ISO 7438:2016

Jedná se o českou verzi mezinárodní normy zkoušky ohybem.

Tabulka 9 – Norma ČSN EN ISO 7438.

Označení normy	ČSN EN ISO 7438:2016
Třídící znak	420401
Název normy	Kovové materiály - Zkouška ohybem
Místo vydání	Praha
Nakladatel	Český normalizační institut
Rok vydání	2016

Zkušební těleso je podepřeno dvěma válcovými podpěrami z jeho spodní strany. Z horní strany je do zkušebního tělesa vtlačován válcový trn. Trn způsobuje ohyb zkušebního tělesa. K této zkoušce se musí použít těleso kruhového, čtvercového, pravoúhlého nebo polygonálního průřezu. Jakékoliv oblasti ovlivněné stříhem, řezáním plamenem nebo podobnými operacemi se před zkouškou musí odstranit.



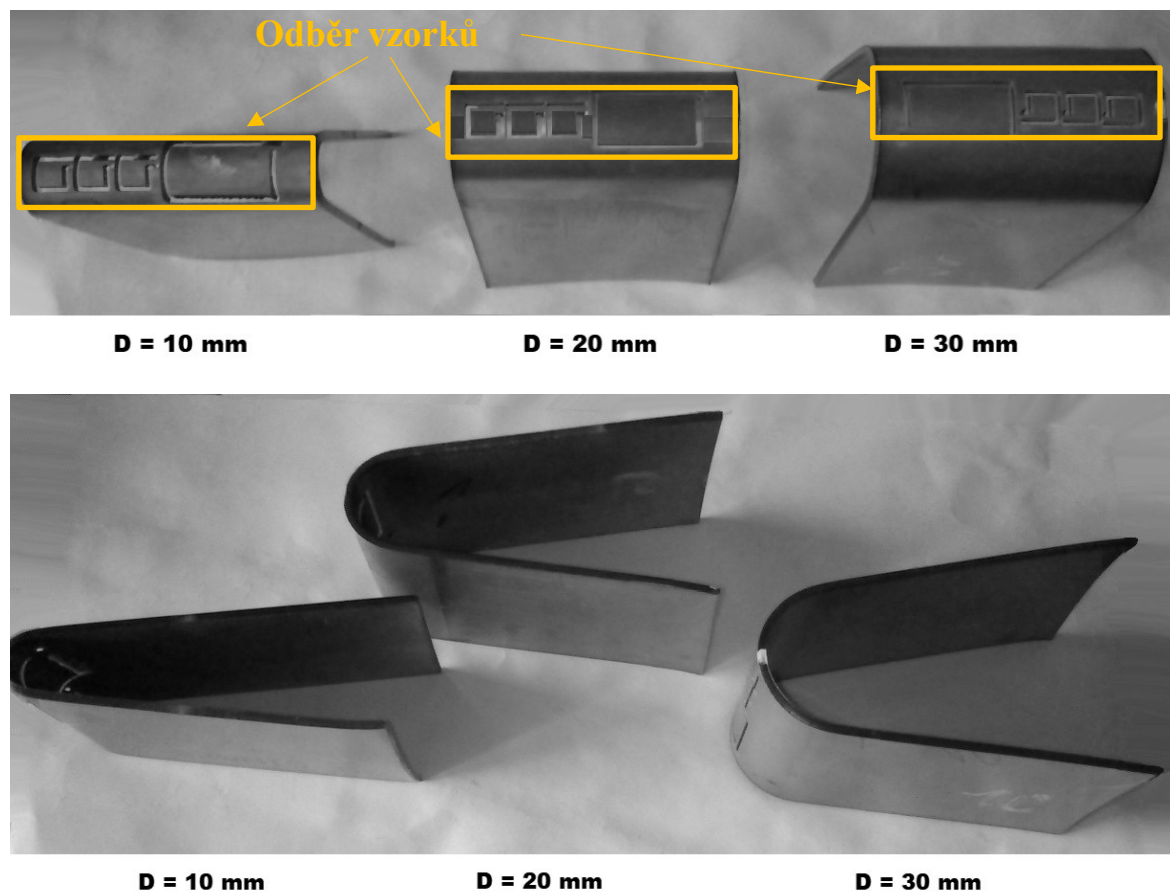
Ohýbací přípravek se dvěma podpěrami a trnem

Obrázek 19 – Zkouška ohybem. [22]

Tabulka 10 – Zkouška ohybem. [22]

Značka	Význam	Jednotka
a	Tloušťka nebo průměr zkušebního tělesa	(mm)
b	Šířka zkušebního tělesa	(mm)
L	Délka zkušebního tělesa	(mm)
l	Vzdálenost mezi podpěrami	(mm)
D	Průměr trnu	(mm)
α	Úhel ohybu	stupně

Zařízení pro zkoušku ohybem bylo využito jen z důvodu tváření pásů korozivzdorných austenitických ocelí za studena, kdy byly následně hodnoceny změny jejich magnetických vlastností. Nejedná se tedy o zkoušení materiálu ohybem. Tvářením ohybem byly podrobeny všechny typy vybraných austenitických korozivzdorných ocelí (1.4307, 1.4404, 1.4845), s průměrem ohýbacího trnu $D = 10, 20, 30$ mm.



Obrázek 20 – Ocelové vzorky tvářené ohybem.

6.4 Žihání vzorků austenitických korozivzdorných ocelí

Žihání vzorků bylo provedeno ve vakuové žíhací peci určené pro vysokoteplotní žihání ve vakuu či inertní atmosféře. Používá se pro žihání kovových bloků, drátů a tyčí s cílem zlepšit jejich chemickou a strukturní homogenitu. Žihání proběhlo ve vakuu při teplotě $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 30 minut, následovalo pozvolné ochlazení v peci až na pokojovou teplotu. Rychlost náběhu na žíhací teplotu byla $0,2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$. Technické parametry vakuové pece:

- odporový ohřev (grafit),
- max. teplota $\approx 2200\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- vakuum $1 \times 10^{-3}\text{ Pa}$,
- aplikace inertní atmosféry (argon, dusík, apod.),
- automatické řízení procesu

7 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY NA VZORCÍCH PŘED A PO TVÁŘENÍ ZA STUDENA

7.1 SEM analýza a chemická analýza povrchu korozivzdorných austenitických ocelí před tvářením

Skenovací elektronový mikroskop (popř. rastovací elektronový mikroskop) je zařízení využívající sekundárních elektronů (SE) nebo odražených sekundárních elektronů (BSE) k zobrazení povrchu materiálů s vysokou přesností. První SEM (nikoli však první elektronový mikroskop) byl zkonstruován ruským vynálezcem Vladimírem Kozmičem Zvorykinem v roce 1942. Elektrony jsou v SEM urychlovány napětím 0,1 až 50 kV. [19]

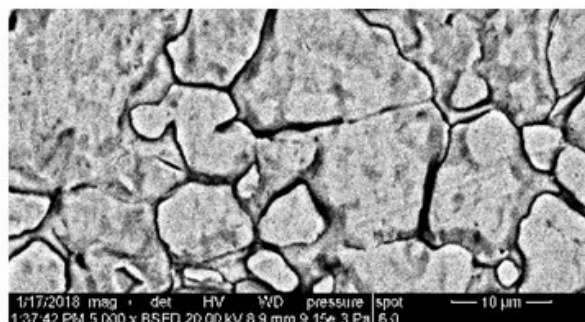
Tyto analýzy byly provedeny v laboratoři Institutu čistých technologií těžby a užití energetických surovin, VŠB – Technické univerzity Ostrava. Skenovací elektronový mikroskop FEI Quanta 650 FEG vybavený analyzátory WDX (wavelength dispersive X-ray spectroscopy), EDX (energy dispersive X-ray spectroscopy) a EBDS (elektron backscatter diffraction) byl využit pro analýzu povrchu vzorků a chemickou analýzu korozivzdorných austenitických ocelí. Jde o systém vybavený analytickými nástroji pro detailní chemickou, krystalografickou a morfologickou charakteristiku nejrozličnějších materiálů. Samotný mikroskop umožňuje práci ve velkém rozsahu zvětšení (6 až 2 000 000 krát), a to i při velmi nízkém vakuu (až do 4000 Pa v režimu ESEM) a bez úprav povrchů vzorků pokovováním. Z analytických nástrojů je mikroskop vybaven energiově a vlnově disperzním analyzátorem, katodově luminiscenčním analyzátorem včetně spektrometru a přístrojem pro difrakci zpětně odražených elektronů.

Dílčí závěr

SEM analýza a chemická analýza povrchu korozivzdorných austenitických ocelí byla provedena na vzorcích před tvářením, tzn. na zakoupených ocelích. Ze SEM analýzy vzorků je vidět, že povrch vzorků není celistvý, vykazuje četné množství povrchových trhlin. Bodová analýza chemického složení jednotlivých typů oceli se shodovala s chemickou analýzou zjištěnou z plochy o velikosti 50 μm x 50 μm . EDX bodová analýza povrchu jednotlivých ocelí (obr. 21), která ukazuje množství chemických prvků s největším zastoupením ve struktuře do hloubky přibližně 1 μm prokázala, že chemické složení jednotlivých typů ocelí odpovídá chemickému složení uvedené výrobcem a dodavatelem v materiálovém listu. Nepatrné rozdíly v chemickém složení s materiálovými listy jsou způsobeny špatnou detekční schopností pro lehké prvky.

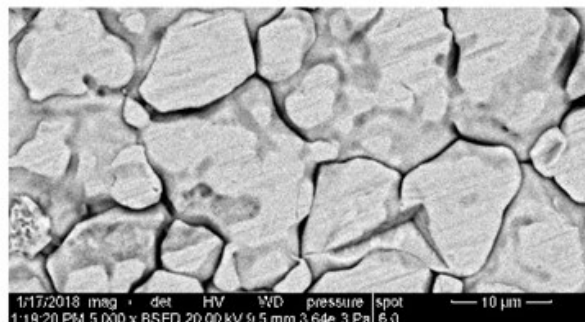
Ocel 1.4307 netvářená

Prvek	hm. %	at. %
C	02,20	09,35
Si	00,48	00,87
Cr	18,08	17,73
Mn	01,86	01,73
Fe	69,31	63,30
Ni	08,07	07,01



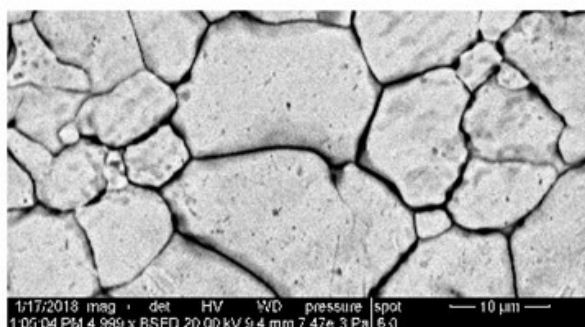
Ocel 1.4404 netvářená

Prvek	hm. %	at. %
Si	00,66	01,30
Mo	02,38	01,38
Cr	17,52	18,73
Mn	01,60	01,62
Fe	67,49	67,17
Ni	10,36	09,81

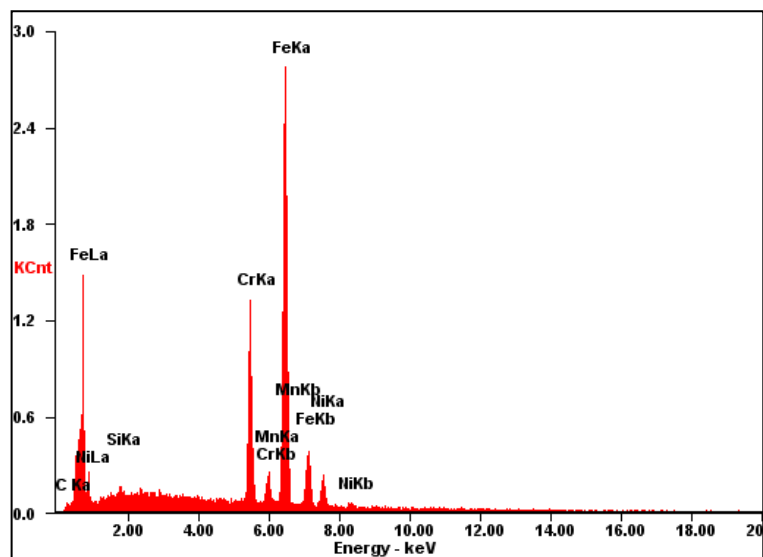


Ocel 1.4845 netvářená

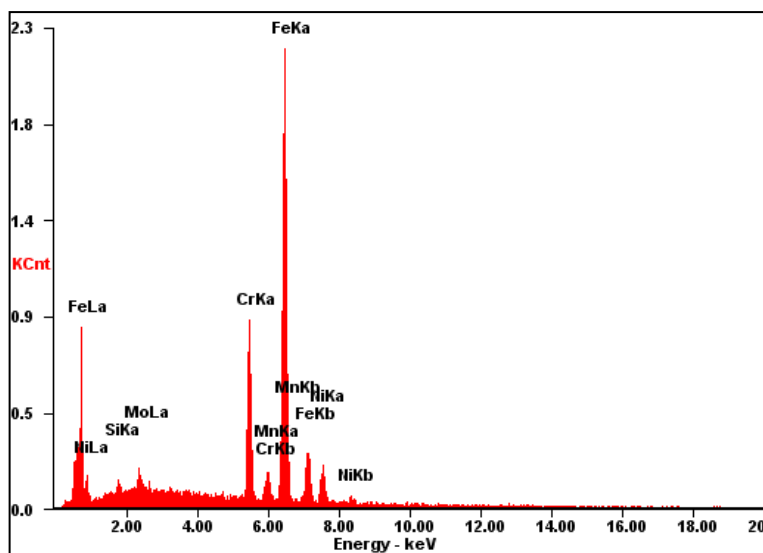
Prvek	hm. %	at. %
Si	00,58	01,13
Cr	22,07	23,42
Fe	56,77	56,09
Ni	20,59	19,35



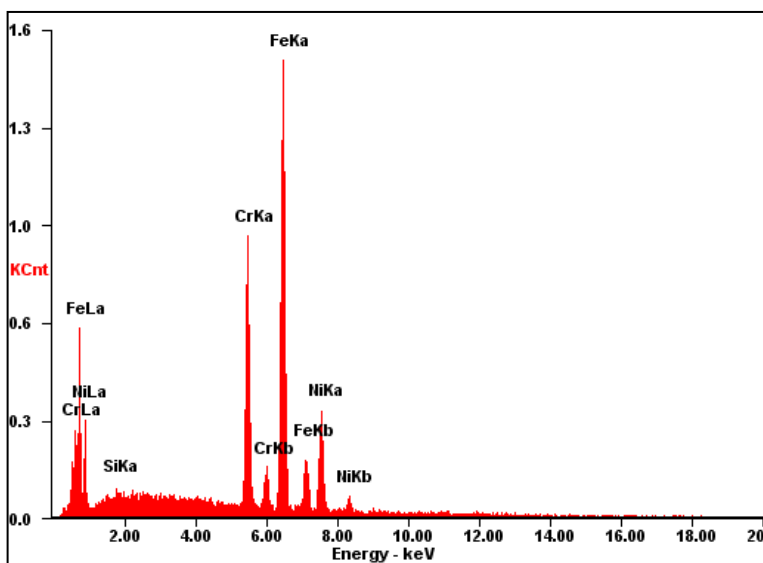
Obrázek 21 – SEM, EDX bodová analýza povrchu netvářených typů oceli.



Netvářený 1.4307



Netvářený 1.4404



Netvářený 1.4845

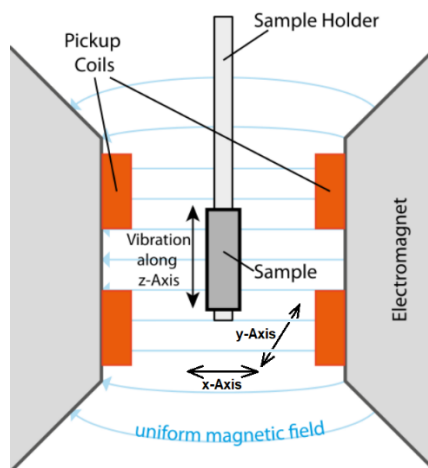
Obrázek 22 – EDX spektra ocelí.

7.2 Měření objemových magnetizačních křivek ocelí před tvářením, po tvářením metodou DRECE a po žhání

Měření magnetizačních hysterezních smyček bylo provedeno pomocí vibračního magnetometru VSM EV 9 firmy Microsense. VSM je anglická zkratka, Vibrating Sample Magnetometer. Jedná se o zařízení využívající princip, kde detekční cívky na pólech elektromagnetu snímají indukované napětí z důvodu vibrování měřeného vzorku. V zařízení VSM tak dochází vibrací magnetického vzorku k časové změně magnetického indukčního toku (periodickému posunu indukčních čar) podle Faradayova zákona elektromagnetické indukce. Tyto změny proporcionálně odpovídají magnetickému momentu vzorku, který je měřen a zaznamenáván na počítači v jednotkách emu. Magnetický moment může být zobrazen jako funkce intenzity magnetického pole, úhlu natočení a teploty vzorku. [20]

Vzorek je ve VSM uchycen pomocí tyčinky z křemene. Tato tyčinka je na druhém konci upevněna do zdroje vibrací. Vzorek je umístěn a kalibrován tak, aby se nacházel ve středu mezi pólovými nástavci elektromagnetu. Magnetizační křivka poté ukazuje závislost magnetického momentu na pomalu se měnícím magnetickém poli a tedy podává informaci o tom, jaký vliv má působení vnějšího magnetického pole na magnetické vlastnosti zkoumaného materiálu. V diplomové práci představují magnetizační křivky závislost hmotnostní magnetizace na intenzitě magnetického pole. Hmotnostní magnetizace byla získaná jako podíl magnetického momentu (jednotka: emu) experimentálního vzorku a hmotnosti experimentálního vzorku (jednotka: gramy).

Vibrační magnetometr EV9 VSM firmy MicroSense je široce používaným experimentálním zařízením ke stanovení magnetických vlastností nejrůznějších typů materiálů. Měření probíhalo při teplotě 20 °C.



Obrázek 23 – Schéma VSM. [21]

Software Easy VSM

EasyVSM je intuitivní program založen na programovacím jazyce LabVIEW. Před měřením magnetických vlastností je třeba provést kalibraci. EasyVSM nabízí mnoho druhů kalibrace, ta nejdůležitější je kalibrace polohy vzorku, která se musí provést u každého měření, kde byl vložen nový vzorek. Při kalibraci polohy vzorku kalibrujeme ve třech osách.

- Osa x – výstupní signál musí nabývat minima
- Osa y – výstupní signál musí nabývat maxima
- Osa z – výstupní signál musí nabývat maxima

Měření mohou být provedena individuálně nebo v sekvenci za sebou. Software umožňuje množství předdefinovaných měření.

- Panenská magnetizační křivka
- Hysterezní smyčka
- Remanentní křivka
- DC Demagnetizace
- Úhlová remanence
- AC remanence
- Časová závislost



Obrázek 24 – Vibrační magnetometr EV9 VSM firmy MicroSense.

V další části diplomové práce jsou uvedeny magnetizační křivky všech vybraných typů ocelí. Hodnoty magnetizace jsou zobrazeny jako funkce intenzity magnetického pole. Při měření magnetizačních křivek byla použita CGS soustava jednotek. Převody jednotek ze soustavy CGS do soustavy SI, nám objasňuje tab. 11. Z magnetizačních křivek jsou stanoveny následující parametry:

M_{20} – magnetizace při intenzitě magnetického pole 20 000 Oe. Při tomto aplikovaném poli nebyly vzorky vždy zcela magneticky nasyceny. Jednotka: $\text{emu} \cdot \text{g}^{-1}$.

M_r – remanentní (zbytková) magnetizace, která v materiálu zůstává i při poklesu intenzity magnetického pole na nulu. Jednotka: $\text{emu} \cdot \text{g}^{-1}$.

H_c – koerzivní pole, udává velikost vnějšího pole, při kterém je celková magnetizace v materiálu nulová. Jednotka: Oe.

Tabulka 11 – Převod jednotek ze soustavy CGS na jednotky soustavy SI.

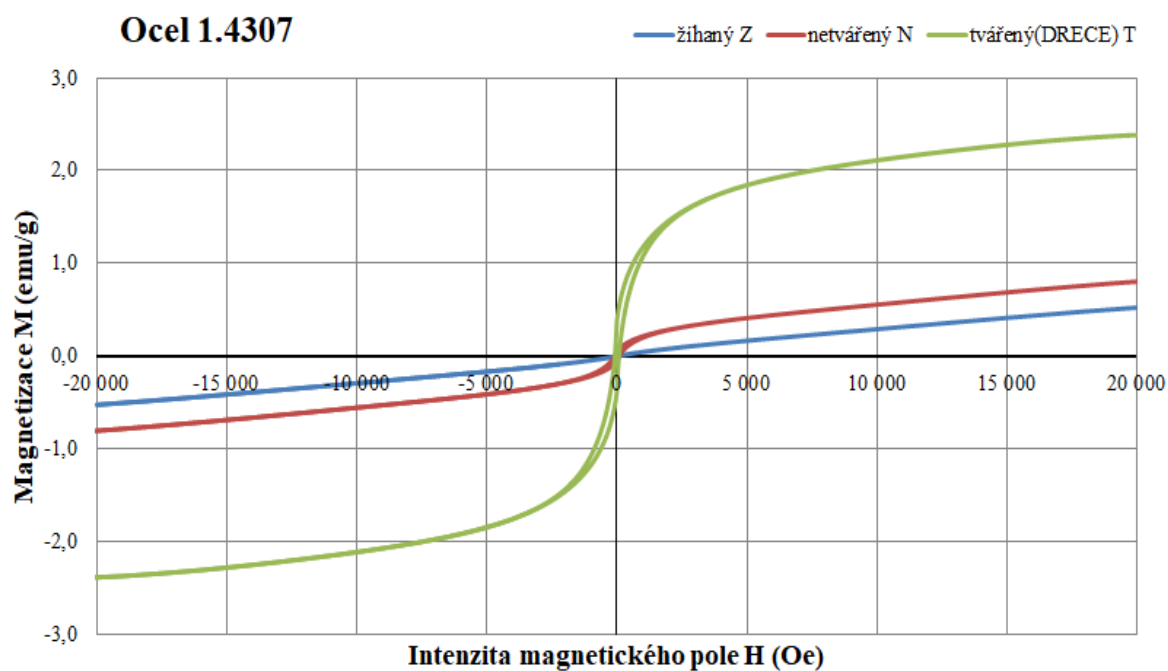
Název	symbol	CGS	Konverzní faktor	SI
Intenzita magnetického pole	\vec{H}	oersted (Oe), $\text{Gb} \cdot \text{cm}^{-1}$	$10^3 \cdot (4\pi)^{-1}$	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
Magnetická indukce	\vec{B}	gauss (G)	10^{-4}	T, $\text{Wb} \cdot \text{m}^{-2}$
Magnetický moment	$\vec{\mu}_m$	emu	10^{-3}	$\text{A} \cdot \text{m}^2$, $\text{J} \cdot \text{T}^{-1}$
Magnetizace (hmotnostní)	\vec{M}_m	emu/g	$14\pi \cdot 10^{-7}$	$\text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Wb} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$
Magnetizace (objemová)	\vec{M}	G	$10^3 \cdot (4\pi)^{-1}$	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
Permeabilita	μ	(-)	$4\pi \cdot 10^{-7}$	$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$
Relativní permeabilita	μ_r	nedefinováno		(-)

Tabulka 12 – Technické parametry VSM EV9. [18, 21]

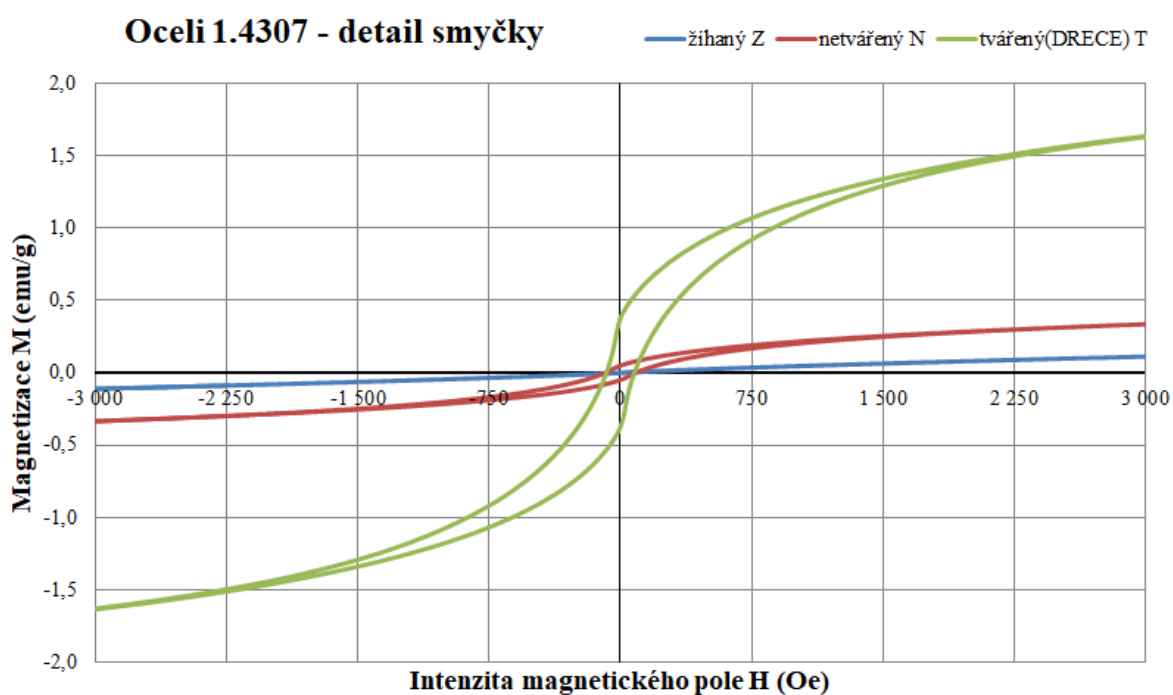
Maximální magnetické pole	26 000 Oe při mezeře 5 mm mezi pólovými nastavci		
	24 000 Oe při mezeře 10 mm mezi pólovými nastavci		
Rozlišení pole a šum	Rozsah	Rozlišení (Oe)	Šum (rms, Oe)
	32 kOe	1	0,050
	3,2 kOe	0,1	0,015
	320 Oe	0,01	0,010
	32 Oe	0,001	0,004
Magnetický moment	Dynamický rozsah 0,1 μ emu – 100 emu		
	Šum (bez středování smyček) 1 μ emu při mezeře 5 mm mezi pólovými nastavci 1,5 μ emu při mezeře 10 mm mezi pólovými nastavci		
Rozměry měřených vzorků	Omezeny pouze v jedné ose mezerou pólových nastavců (min. 5 mm, max. 85 mm), ostatní rozměry neomezeny		
Teplotní měření	Rozsah teplot -170°C až 720°C, rozlišení 0,1°C		
	Maximální magnetické pole 21 000 Oe		
	Rozměry vzorků Teplotní komora má tvar válce s vnitřním průměrem 10 mm a výškou 50 mm		
Měření magnetické rezistence	Rozsah odporů 1m Ω až 1M Ω		
	Rozsah teplot -150°C až 400°C		
	Rozměry vzorků Kvadr o šířce 3 mm, min. délce 10 mm a max. výšce 3 cm		
Základní měřené parametry	Koercitivní pole, pole v nasycení, magnetický moment v nasycení, magnetický moment v remanenci, relativní permeabilita, směry snadných os, Curieho teplota, remanentní křivky		

Tabulka 13 – Parametry nastavení magnetického pole při měření a krok měření.

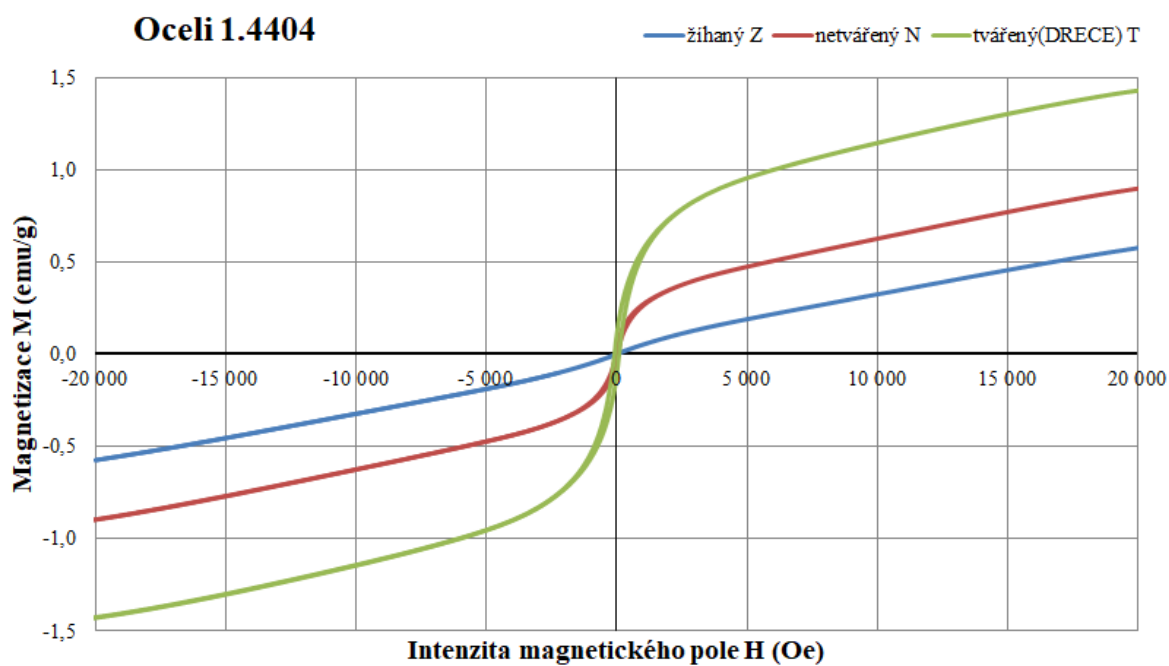
Krok měření (Oe)	Parametry nastavení magnetického pole (Oe)	
	od	do
500	- 20 000	- 3 000
20	- 3 000	3 000
500	3 000	20 000



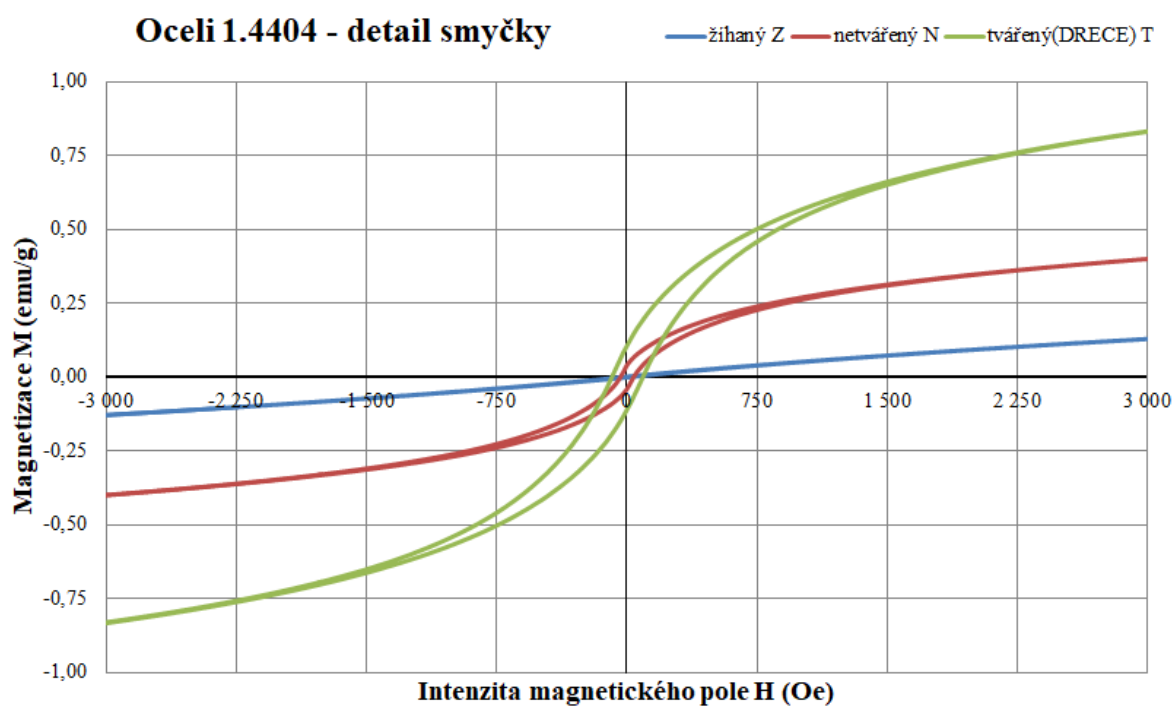
Obrázek 25 – Magnetizační křivky oceli 1.4307 (Z, N, T).



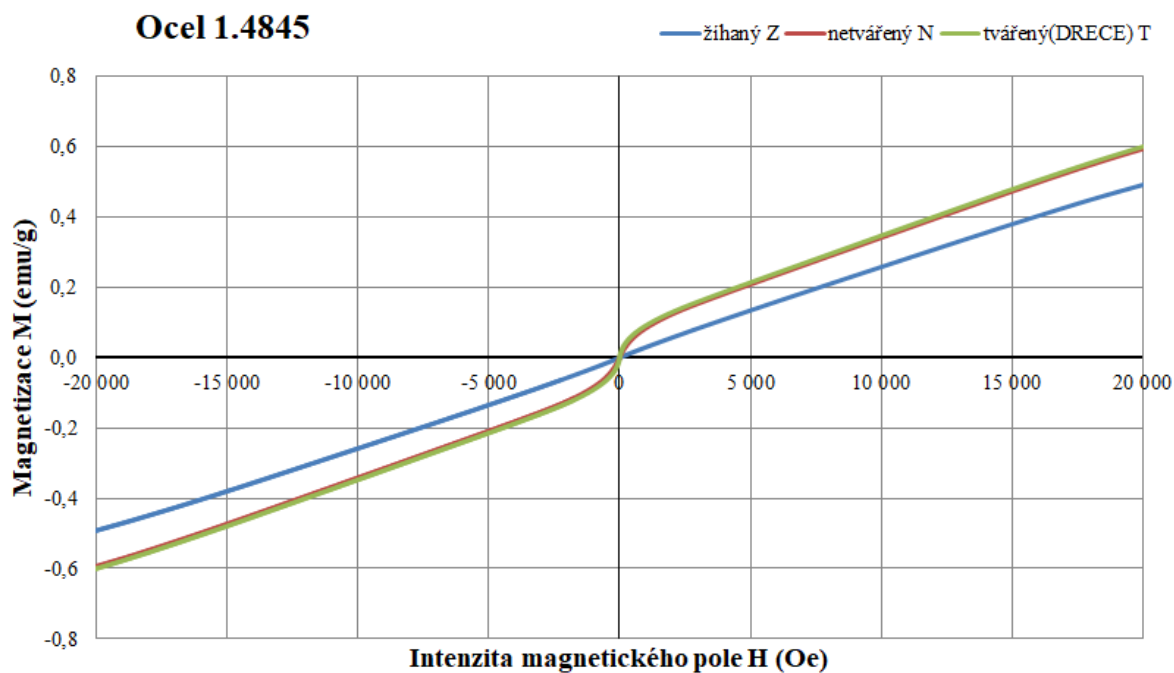
Obrázek 26 – Magnetizační křivky oceli 1.4307 (Z, N, T) – detail.



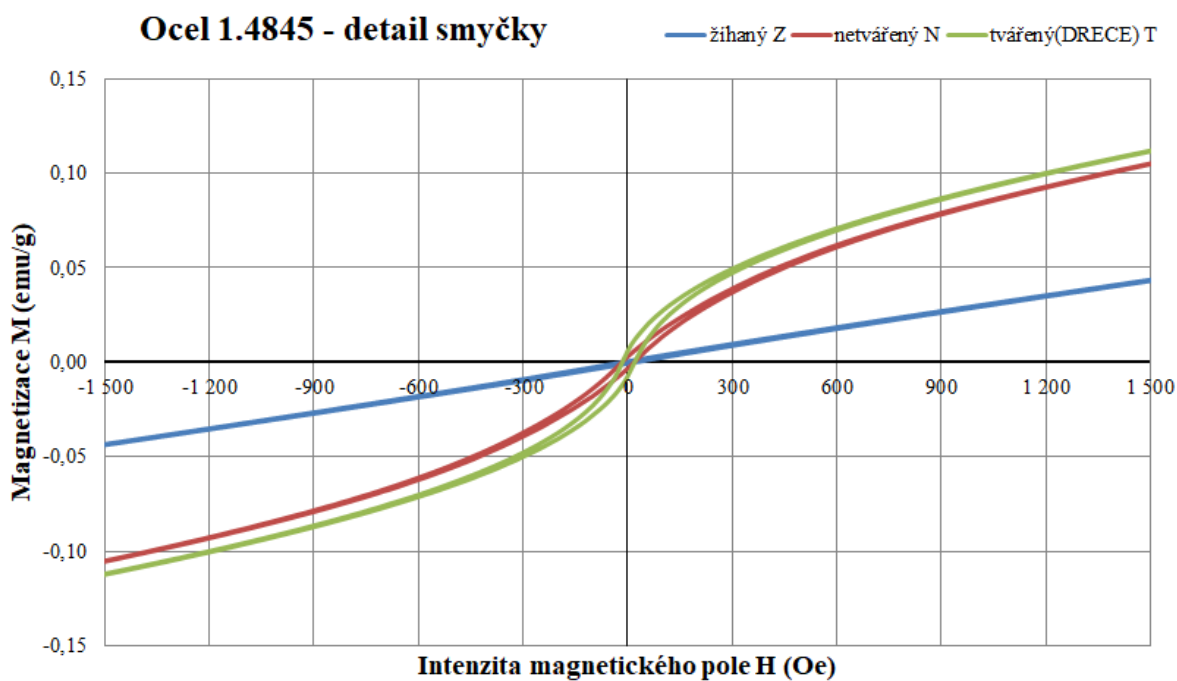
Obrázek 27 – Magnetizační křivky oceli 1.4404 (Z, N, T).



Obrázek 28 – Magnetizační křivky oceli 1.4404 (Z, N, T) – detail.



Obrázek 29 – Magnetizační křivky oceli 1.4845 (Z, N, T).



Obrázek 30 – Magnetizační křivky oceli 1.4845 (Z, N, T) – detail.

Zkratky použité v kapitole:

- *N – Netvářený vzorek, pás oceli po zakoupení*
- *T – Materiál tvářený, pás oceli tvářený metodou DRECE*
- *Z – Materiál vyžíhaný, pás oceli vyžíhaný při teplotě 950°C po dobu 30 minut (po tváření metodou DRECE)*

Tabulka 14 – Parametry magnetizačních křivek vzorků před tvářením, po tváření DRECE a po žihání.

Ocel	1.4307			1.4404			1.4845		
Typ	Z	N	T	Z	N	T	Z	N	T
M_{20} (emu/g)	0,5234	0,8037	2,3836	0,5754	0,8978	1,4301	0,4922	0,5944	0,6007
M_r (emu/g)	0,0065	0,0491	0,3760	0,0015	0,0389	0,1060	0,0006	0,0030	0,0060
$\frac{M_r}{M_{20}}$ (-)	0,0124	0,0611	0,1579	0,0026	0,0434	0,0741	0,0012	0,0051	0,0100
H_c (Oe)	29,40	86,15	79,72	25,55	38,00	89,24	19,25	17,90	17,54
m (g)	0,3298	0,3172	0,3337	0,3333	0,3233	0,3340	0,3465	0,3189	0,3431

Dílčí závěr

Při srovnání magnetických parametrů vybraných typů austenitických nerezových ocelí bylo zjištěno, že parametry remanentní magnetizace u všech vybraných typů ocelí jsou větší po deformaci za studena, u oceli 1.4307 přibližně 7,6 krát, u oceli 1.4404 přibližně 2,7 krát a u oceli 1.4845 přibližně 2 krát.

Parametry magnetizace při magnetickém poli 20 kOe jsou u vybraných typů ocelí po tváření za studena větší než před tvářením, u oceli 1.4307 přibližně 3 krát, u oceli 1.4404 přibližně 1,6 krát. Výjimkou je ocel 1.4845, kdy velikost magnetizace před tvářením a po tváření je stejná.

Velikost koercitivního pole u ocelí se značením 1.4307 a 1.4845 po tváření za studena nevykazuje velké rozdíly oproti vzorkům netvářeným. Ocel 1.4404 vykazuje nárůst koercitivního pole 2,3 krát.

Po žihání došlo u všech typů vybraných ocelí ke snížení remanentní magnetizace, velikosti koercitivního pole i magnetizace při magnetickém poli 20 kOe.

Z výsledků měření bylo zjištěno, že čím vyšší je poměr niklu a chromu u ocelí tím stabilnější je austenitická struktura a menší magnetickou odezvu vyvolá deformace za studena.

Přítomnost a množství slitinových prvků ovlivňuje výsledné magnetické vlastnosti austenitické korozivzdorné oceli po tváření za studena. Slitinové prvky a jejich množství je nutno volit u austenitických korozivzdorných ocelí s ohledem na jejich požadované finální aplikační použití. Nalezení korelace mezi jednotlivými prvky a výslednými magnetickými vlastnostmi je takřka nemožné, proto hledáme tyto závislosti mezi niklovým ekvivalentem a požadovanou vlastností.

Intenzita magnetického pole při měření magnetizačních křivek byla generována ve směru tváření vzorku metodou drece. Magnetická anizotropie vzorků byla posuzována poměrem remanentní magnetizace a magnetizace při poli 20 kOe. Pokud poměr $\frac{M_r}{M_{20}} = 1$, pak je vnější magnetické pole aplikováno ve směru snadné osy magnetizace. Pokud se poměr $\frac{M_r}{M_{20}} = 1$ blíží nule je magnetické pole aplikováno ve směru obtížné osy magnetizace.

U všech vybraných typů oceli došlo po tváření za studena k nárustu tohoto poměru. Ocel 1.4307T vykazuje po tváření nejvyšší nárůst poměru M_r/M_{20} a to 1,6 krát oproti netvářenému stavu. Po žíhání se hodnota poměru M_r/M_{20} snížila vůči hodnotě netvářené (zakoupené oceli). Zakoupená ocel byla již při výrobě plechu tvářena válcováním.

Magnetická anizotropie vzorků byla rovněž zkoumána rotací vzorků v rovině xy o úhel 90° vůči původní orientaci vzorků (původní orientace byla ve směru tváření metodou DRECE). Naměřené magnetizační křivky byly po otočení experimentálního vzorku identické, nedošlo ke změně poměru M_r/M_{20} .

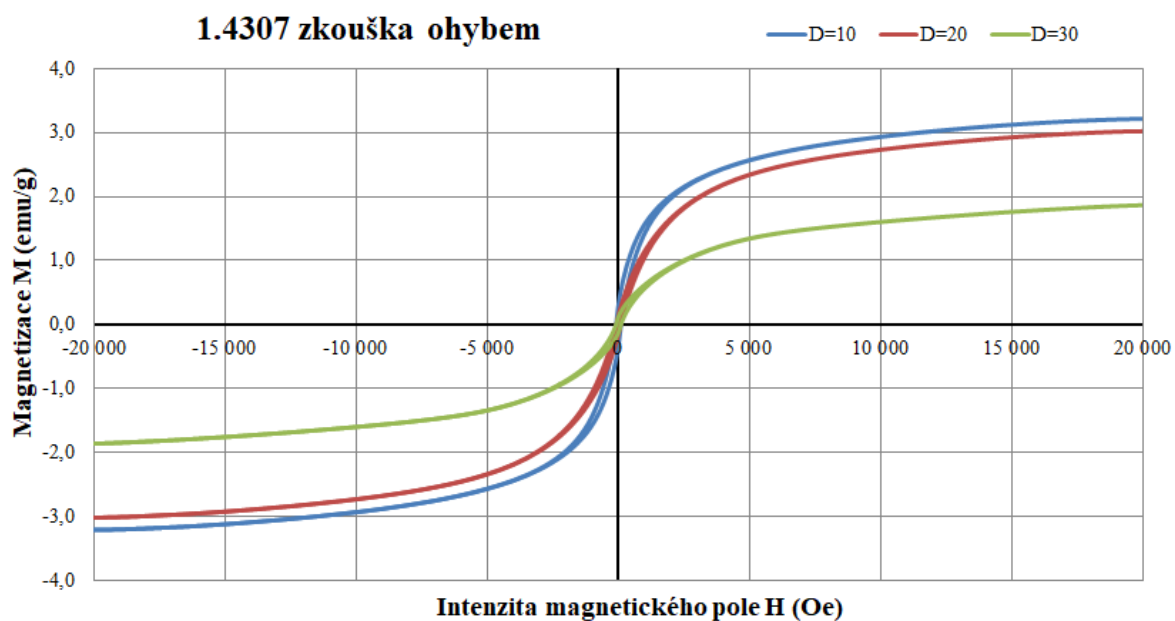
7.3 Měření objemových magnetizačních křivek ocelí po tváření ohybem dle normy ČSN EN ISO 7438:2016

Tabulka 15 – Naměřené hodnoty pro oceli tvářené zkouškou ohybem.

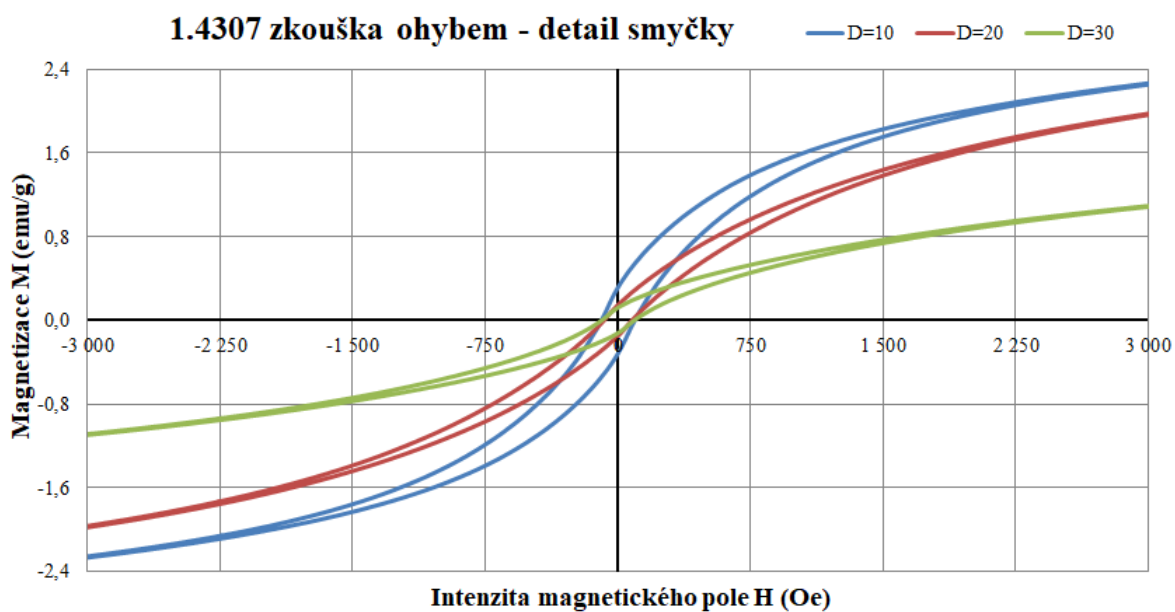
Ocel	1.4307			1.4404			1.4845		
Ø trnu (mm)	10	20	30	10	20	30	10	20	30
M_{20} (emu/g)	3,2131	3,0209	1,8651	1,1384	0,9974	1,0474	0,5647	0,5687	0,5629
M_r (emu/g)	0,3158	0,1479	0,1214	0,0647	0,0610	0,0781	0,0040	0,0068	0,0037
$\frac{M_r}{M_{20}}$ (-)	0,0982	0,0489	0,0651	0,0568	0,0612	0,0746	0,0071	0,0119	0,0066
H_c (Oe)	94,36	78,56	92,21	93,09	81,43	77,72	12,61	19,69	19,83
m (g)	0,4077	0,3883	0,3935	0,4126	0,3978	0,3910	0,4083	0,3915	0,3890

Tabulka 16 – Naměřené hodnoty pro netvářené oceli (po zakoupení).

Ocel	1.4307N	1.4404N	1.4845N
M_{20} (emu/g)	0,8037	0,8978	0,5944
M_r (emu/g)	0,0491	0,0389	0,0030
$\frac{M_r}{M_{20}}$ (-)	0,0611	0,0434	0,0051
H_c (Oe)	86,15	38,00	17,90
m (g)	0,3172	0,3233	0,3189



Obrázek 31 – Magnetizační křivky oceli 1.4307 (zkouška ohybem).



Obrázek 32 – Magnetizační křivky oceli 1.4307 (zkouška ohybem – detail).

Dílčí závěr

Při srovnání magnetických parametrů vybraných typů austenitických nerezových ocelí po tváření za studena ohybem bylo zjištěno, že parametry remanentní magnetizace se po tváření zvýšily u všech typů oceli. Nejvyšší hodnoty remanentní magnetizace byly zjištěny u všech typů oceli při tváření ohybem s průměrem trnu 10 mm, což je způsobenou největším stupněm plastické deformace. U oceli 1.4307 byla remanentní magnetizace zvětšena 6,3 krát, u oceli 1.4404 přibližně 1,65 krát a u oceli 1.4845 přibližně 1,3 krát v porovnání s netvářenou ocelí. Při tváření ohybem s větším průměrem trnu (20 mm a 30 mm) dochází ke snížení hodnot remanentní magnetizace, což je způsobenou nižším stupněm plastické deformace.

Parametry magnetizace při magnetickém poli 20 kOe jsou u vybraných typů ocelí po tváření za studena větší než před tvářením. K největší změně došlo při tváření ohybem s průměrem trnu 10 mm, u oceli 1.4307 se magnetizace zvětšila přibližně 4 krát, u oceli 1.4404 přibližně 1,2 krát. Výjimkou je ocel 1.4845, kdy velikost magnetizace před tvářením a po tváření je stejná. Po tváření metodou DRECE došlo k největšímu nárůstu hodnoty M_{20} u oceli s označením 1.4307.

Velikost koercitivního pole po tváření za studena ohybem u ocelí 1.4307 a 1.4404 je zvětšena ve srovnání s ocelí netvářenou. Největší rozdíl je vidět u oceli 1.4404, kdy velikost koercitivního pole se po tváření zvětšila přibližně 2 krát.

Z výsledků měření bylo zjištěno, že čím vyšší je poměr niklu k chromu, tím stabilnější je austenitická struktura a menší magnetickou odezvu vyvolá deformace za studena.

Při porovnání vzorků po tváření metodou DRECE a zkouškou ohybem ($D = 10$ mm, kdy nastala největší plastická deformace) bylo zjištěno, že remanentní magnetizace u všech zkoumaných ocelí vykazuje vyšší hodnoty u metody DRECE.

7.4 Mössbauerova spektroskopie ocelí před tvářením a po tvářením metodou DRECE

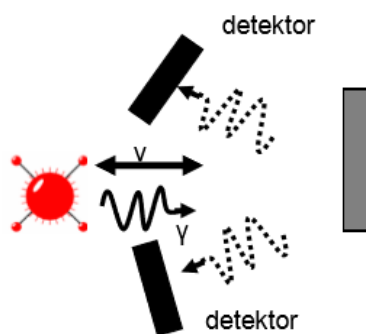
Mössbauerův efekt, na jehož principu Mössbauerova spektroskopie pracuje, objevil německý fyzik Rudolf Ludwig Mössbauer (1929 – 2011), který za tento objev obdržel v roce 1961 Nobelovu cenu za fyziku. Mössbauerova spektroskopie je experimentální metodou používanou ke zkoumání vlastností a složení pevných látek.

V základní podobě se při Mössbauerově spektroskopii vysílá paprsek gama záření, který prochází pevným vzorkem, za nímž je umístěn detektor, který zaznamená přesné hodnoty transmise gama záření. Atomy zdroje záření musí mít stejné protonové číslo jako prvek obsažený ve zkoumaném vzorku, nejčastěji se používá zdroj ^{57}Co a zkoumané vzorky poté obsahují ^{57}Fe . Rozdíl chemického složení zdroje a vzorku způsobí posuv úrovně jaderné energie. Tyto energetické posuvy jsou velice malé (mohou být menší než 1 eV), ale velmi malé šířky spektrálních čar gama záření umožní, aby korespondovaly s výraznými změnami absorbance. Ve výsledném spektru se intenzita gama záření vyhodnotí jako funkce zdrojové rychlosti.

V našem případě, z důvodu velké tloušťky vzorků (2 mm), není transmisní nastavení možno použít. Mössbauerova spektroskopie detekuje ocelové vzorky do hloubky přibližně 25 μm . Proto byl použit režim γ -BMS, kdy na detektoru jsou zachyceny zpětně rozptýlené fotony γ záření.

Experimentální nastavení

Mössbauerovský spektrometr s konstantním zrychlením; zdroj γ -záření ^{57}Co v Rh matrici; kalibrace rychlostní stupnice α -Fe; teplota měření 20,5 °C; uspořádání na odraz (viz obrázek 38). Pro ověření struktury vybraných typů austenitických korozivzdorných ocelí před tvářením (oceli po zakoupení) a po tvářením metodou DRECE byly použity vzorky o velikosti 20 mm x 20 mm x 2 mm.



Obrázek 33 – Nastavení Mössbauerova spektrometru, režim γ -BMS.

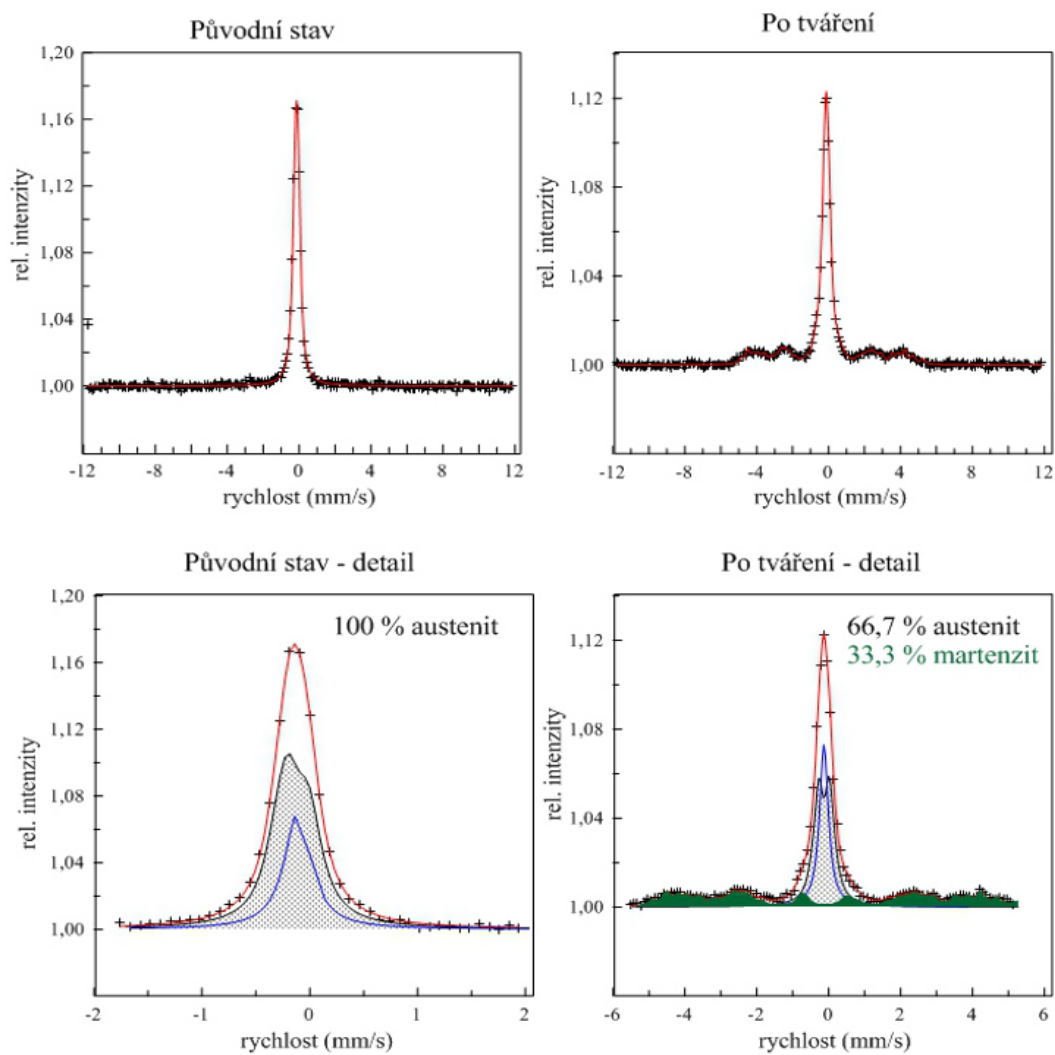
Austenit je paramagnetický a v mössbauerovských spektrech je reprezentován jednou čarou, tzv. singletem, případně dvou-čárovým spektrem, tzv. dubletem, což závisí na složení materiálu. V případě měřených ocelí byla většina spekter prokládána jedním singletem, který je na obrázcích v detailech vyznačen modrou čarou, a dvěma dublety, jejichž suma je vyznačena spektrem (•••••). Singlet je charakterizován pouze izomerním, tzv. chemickým posuvem (IS), dublet izomerním posuvem a kvadrupolovým štěpením (EQ).

Martenzit je feromagnetický a spektrum je šestičarové, tzv. sextet, kterých může být více podle toho, jak se mění okolí rezonujícího atomu železa. Sextet je charakterizován izomerním posuvem, kvadrupolovým štěpením a hyperjemnou indukcí. V obrázcích je v detailu suma sextetů vyznačena zeleně. Podíl celkové plochy všech sextetů k ploše všech singletů a dubletů pak udává poměrné zastoupení austenitu a martenzitu v dané oceli.

Tabulka 17 – Naměřené hodnoty γ -BMS.

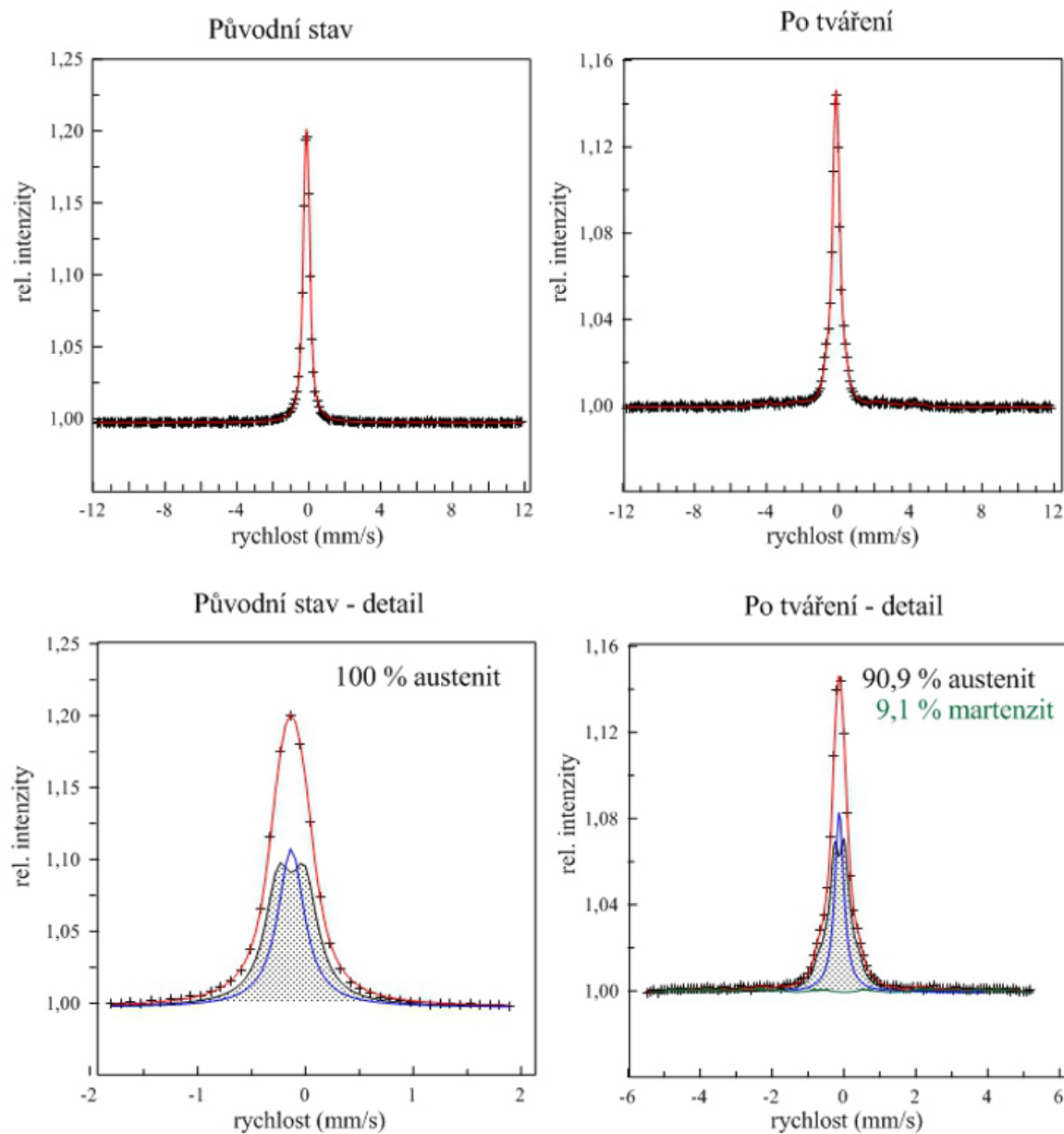
	Ocel	1,4307		1,4404		1,4845	
	Ni	8,0/10,5		10,0		19,15	
	Cr	17,5/19,5		17,2		24,55	
	Stav	Původní	Tvářený	Původní	Tvářený	Původní	Tvářený
Singlet	IS(mm/s)	-0,118	-0,139	- 0,133	- 0,127	-0,107	-0,125
	A (%)	33,0	27,0	41,4	34,1	16,4	37,2
Dublet	IS (mm/s)	-0,144	-0,131	- 0 129	- 0,134	-0,130	-0,120
	EQ (mm/s)	0,181	0,351	0,243	0,422	0,183	0,236
	A (%)	67,0	39,8	58,6	56,8	83,6	62,8
Austenit (%)		100,0	66,7	100,0	90,9	100,0	100,0
Sextet	IS (mm/s)		-0,047		- 0,0279		
	EQ (mm/s)		0,005		- 0,0426		
	B (T)		25,3		25,2		
	A (%)		33,3		9,1		
Martenzit (%)			33,3		9,1		

OCEL 1.4307



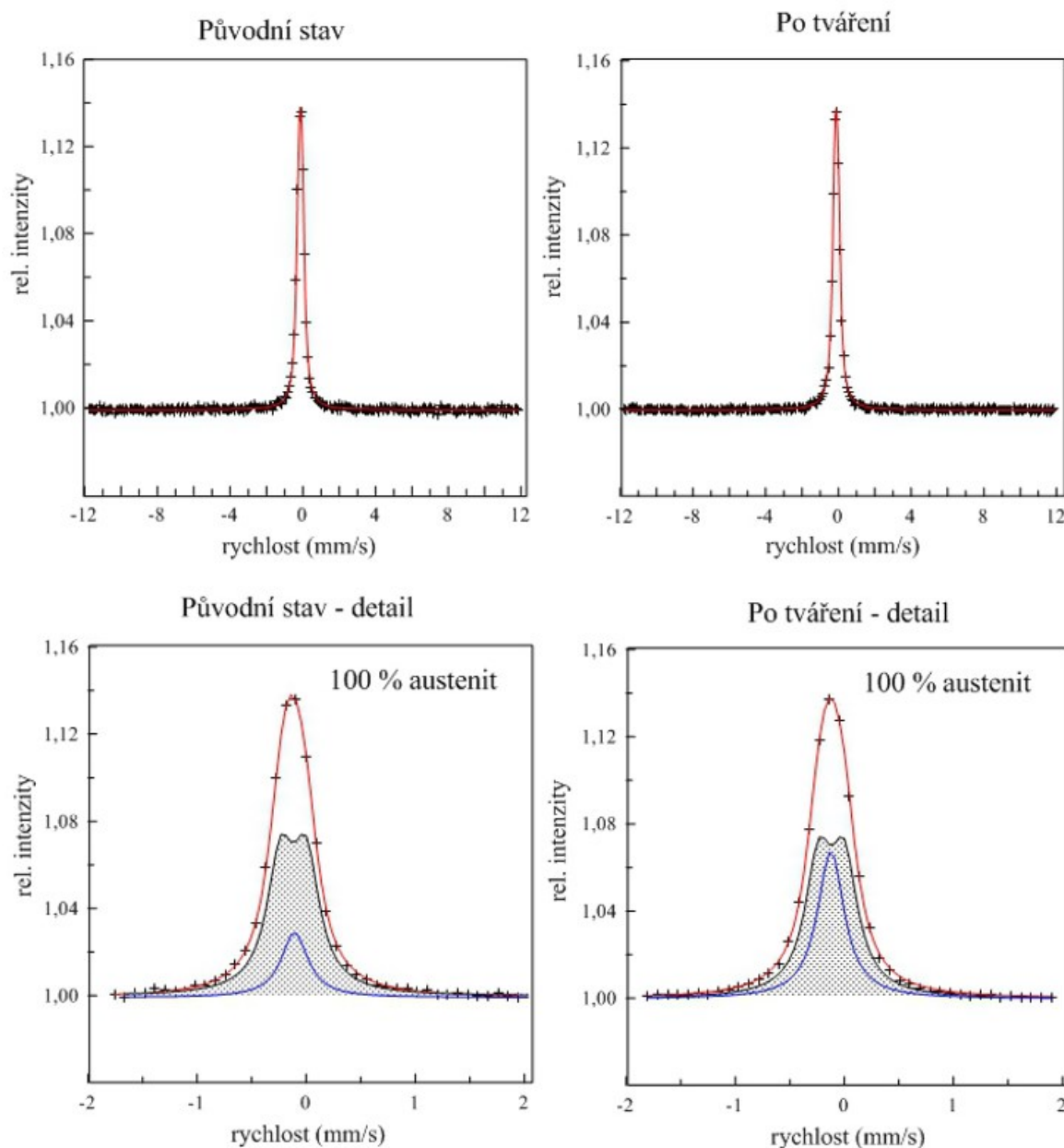
Obrázek 34 – Mössbauerova spektra oceli 1.4307.

OCEL 1.4404



Obrázek 35 – Mössbauerova spektra oceli 1.4404.

OCEL 1.4845



Obrázek 36 – Mössbauerova spektra oceli 1.4845.

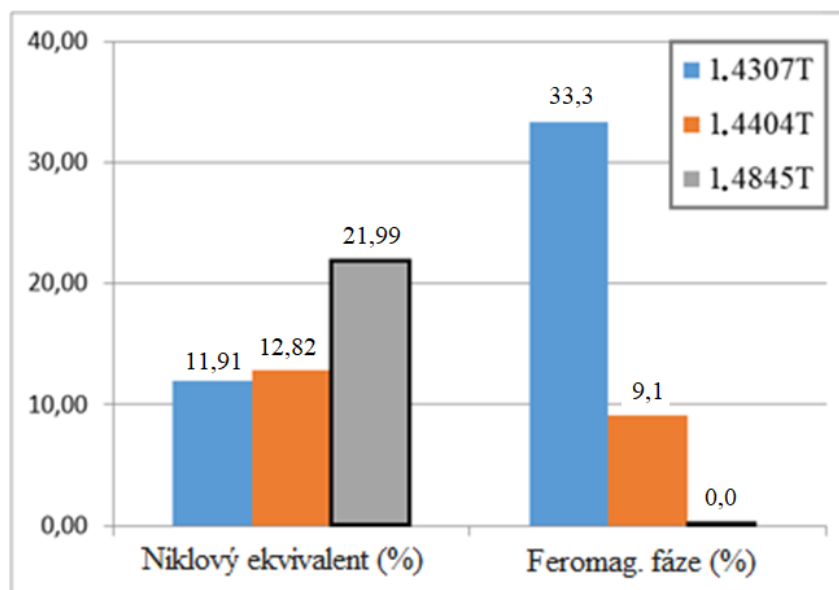
Dílčí závěr

Z Mössbauerovy spektroskopie, která detekuje fáze v ocelích do hloubky přibližně 25 μm bylo zjištěno, že v původním stavu (netvářený stav) jsou všechny oceli austenitické. V tabulce 17 jsou uvedeny parametry pro singlet a průměrné hodnoty izomerního posuvu a kvadrupolového štěpení pro dublety včetně relativního zastoupení (A) komponent ve spektru.

Tvářením korozivzdorných austenitických ocelí dochází po tváření za studena k tzv. bezdifuzní martenzitické transformaci, která vede k tomu, že vedle paramagnetického

austenitu se objevuje feromagnetický martenzit. U měřených tří typů vybraných ocelí je zřejmé, že ocel 1.4307 byla nejvíce náchylná na tvorbu martenzitu po tváření za studena, následovala ji ocel 1.4404 a k detekovatelné transformaci austenit – martenzit nedošlo u oceli 1.4845, která obsahuje nejvyšší podíl Ni a Cr. V tomto sledu jsou oceli uvedeny v tabulce č. 17. Podobně jako u austenitu jsou v tabulce uvedeny průměrné hodnoty izomerního posuvu, kvadrupolového štěpení a hyperjemné indukce také pro martenzit.

Korelace



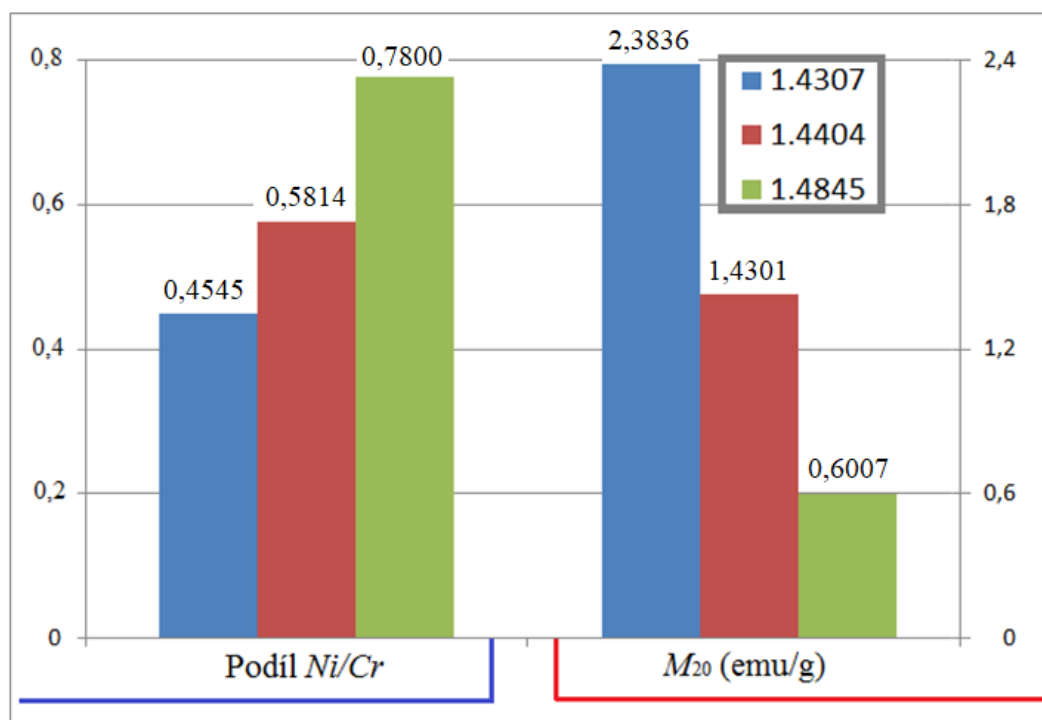
Obrázek 37 – Korelace mezi $Ni_{ekv}(\%)$ a množstvím feromagnetické fáze (%) v oceli po tváření metodou DRECE.

Získané hodnoty množství feromagnetické fáze po tváření metodou DRECE korespondují s niklovým ekvivalentem ocelí, viz obrázek 37. Se zvyšujícím se množstvím austenitotvorných prvků (niklu, manganu) klesá množství feromagnetické fáze ve struktuře po deformaci za studena. Se zvyšujícím se množstvím feritotvorných prvků se zvyšuje množství feromagnetické fáze ve struktuře po deformaci za studena. Se zvyšujícím se niklovým ekvivalentem oceli také klesá hodnota magnetizace M_{20} . Austenitické oceli s vyšším niklovým ekvivalentem jsou více odolné vůči martenzitické transformaci při tváření za studena.

Pro odhadnutí složení struktury v austenitických ocelích je vhodný Schaefflerův diagram, ale pro porozumění závislosti mezi magnetizací (množství martenzitu) a složením nám lépe poslouží poměr niklu a chromu.

Tabulka 18 – Závislost magnetických parametrů a množství austenitu na poměru prvků Ni/Cr v ocelích po tváření metodou DRECE.

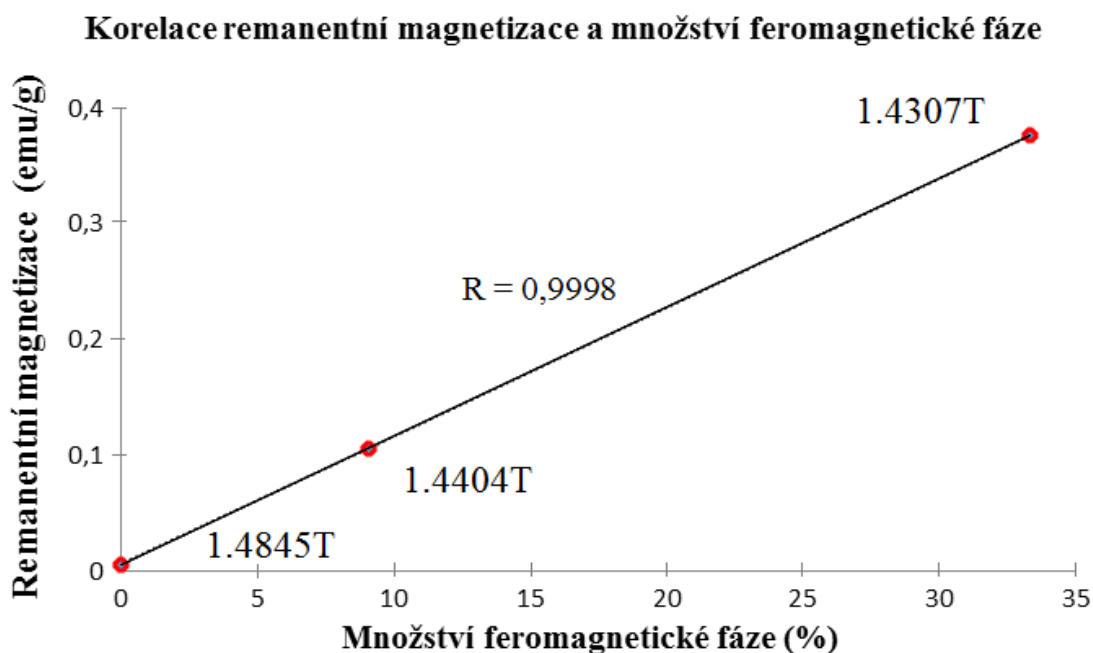
Ocel	$\frac{Ni}{Cr}$	Austenit (%)	M_r (emu/g)	M_{20} (emu/g)
1.4307	0,4545	66,7	0,3760	2,3836
1.4404	0,5814	90,9	0,1060	1,4301
1.4845	0,7800	100	0,0060	0,6007



Obrázek 38 – Korelace mezi Ni/Cr a magnetizací M_{20} v ocelích po tváření metodou DRECE.

Pro závislost magnetických parametrů zjištěných z magnetizačních křivek na struktuře byl stanoven Pearsonův korelační koeficient. Tento koeficient může nabývat hodnot od -1 do $+1$, které značí lineární vztah (záporný nebo kladný). V případě kladné korelace hodnoty obou proměnných současně rostou. V případě neexistence lineárního vztahu je Pearsonův korelační koeficient roven 0. [23]

Získané hodnoty po tváření metodou DRECE byly použity k vytvoření korelační závislosti mezi remanentní magnetizací při magnetickém poli 20 000 Oe a obsahem feromagnetické fáze. Velikost Pearsonova korelačního koeficientu pro závislost remanentní magnetizace na podílu martenzitu ve struktuře je $R = 0,9998$ (viz obr. 39).



Obrázek 39 – Závislost remanentní magnetizace na množství martenzitu v testovaných ocelích po tváření DRECE. [23]

7.5 Metalografický rozbor struktury ocelí před tvářením a po tváření metodou DRECE

Nedílnou součástí materiálového výzkumu je metalografický rozbor. Metalografické posouzení kvality materiálu poskytuje důležité informace a to nejen o stavu polotovaru, ale i konečného produktu. Optickou metalografií rozumíme pozorování metalografických vzorků pomocí optických mikroskopů, a to především klasických světelných mikroskopů nebo speciálních metalografických mikroskopů. Metalografický vzorek je připravený ke studiu struktury materiálu, která není obvykle bez předchozí úpravy pozorovatelná. K jejímu zviditelnění je nutné provést sérii kroků.

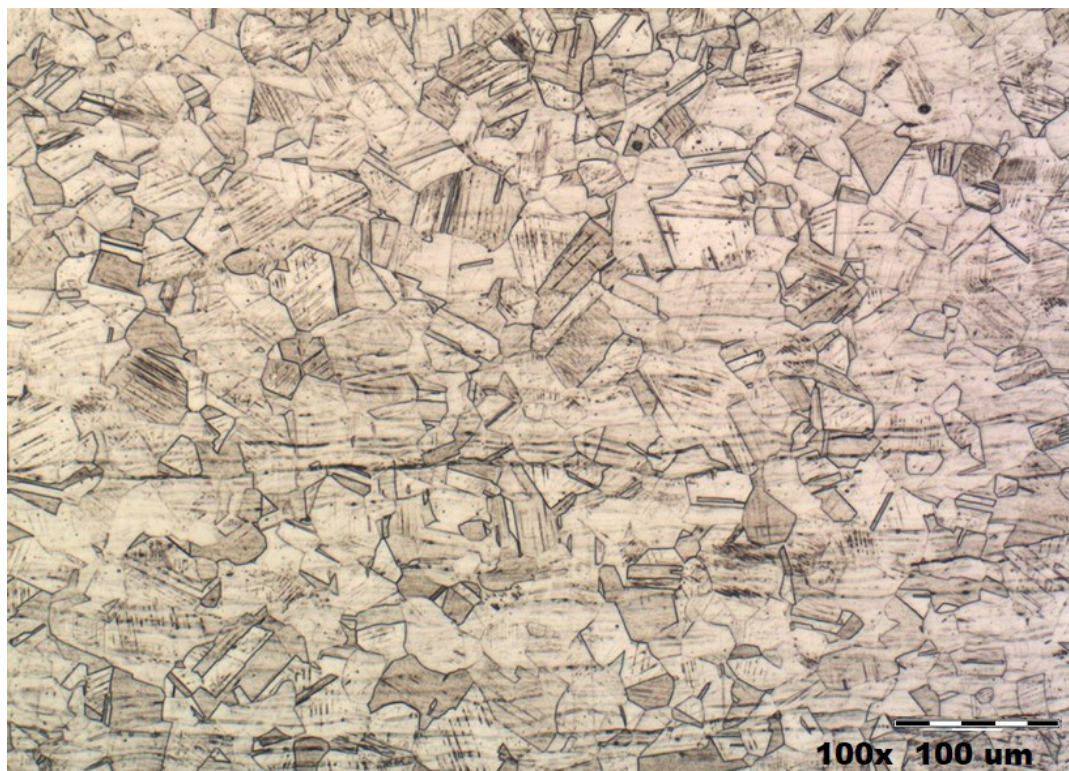
Vzorek, jehož jedna plocha je připravena k metalografické analýze, se nazýváme výbrus. Tyto vzorky, určené pro optickou nebo skenovací elektronovou mikroskopii, se v metalografii používají nejčastěji. Kromě výbrusů je možné analyzovat také speciálně připravené tenké řezy, které jsou určeny k pozorování pomocí optických mikroskopů na průchod světla nebo transmisních elektronových mikroskopů. Již před započítím samotné přípravy vzorku musí být definováno, k jakému účelu má být vzorek určen. Na základě materiálu vzorku, toho, co chceme analyzovat, a s ohledem na použitou mikroskopickou metodu je nutné zvolit odpovídající postup jeho přípravy.

Příprava testovaných vzorků na výbrus:

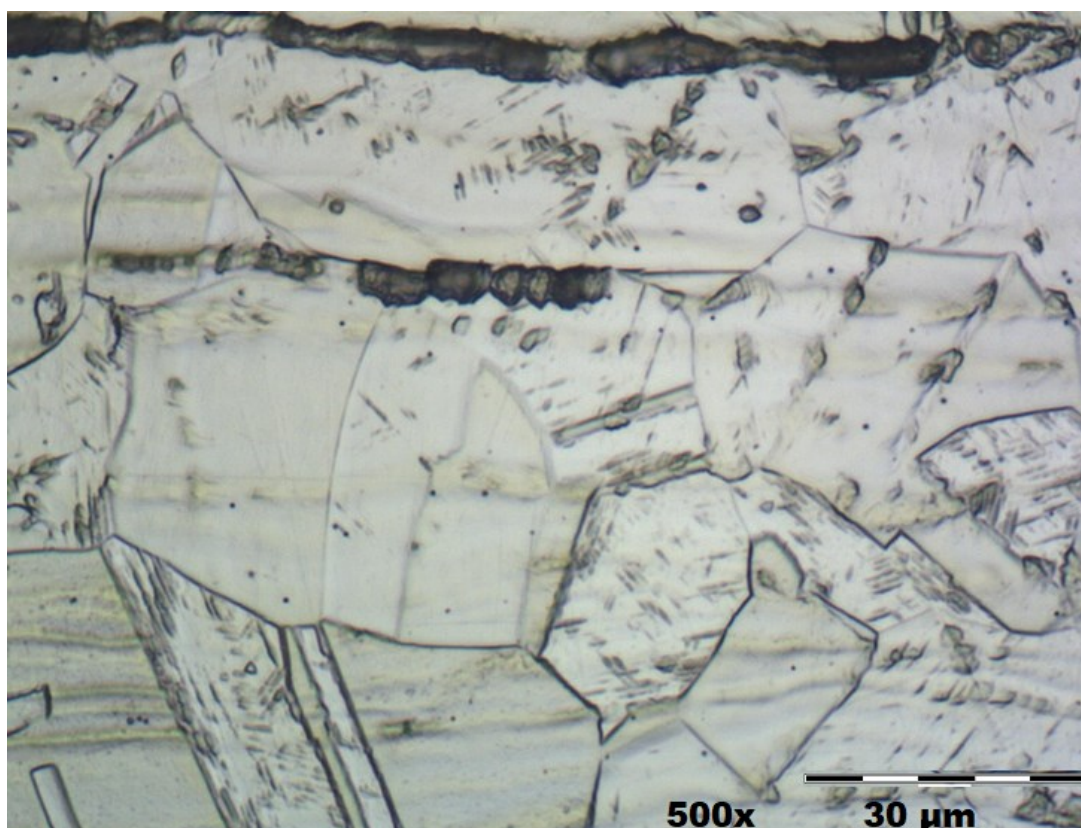
- Z tvářených plechů metodou DRECE byly odřezány kapalinovým paprskem vzorky o velikosti 10x10x2 mm.
- Vzorky byly zalisovány do bakelitového válečku a označeny vibračním perem.
- Následovalo broušení vzorků, které má za cíl minimalizovat povrchové nerovnosti. Broušení bylo provedeno mechanizovaně na kotoučové brusce chlazené vodou.
- Leštění vzorků do zrcadlového vzhledu bylo provedeno za použití diamantové emulze, vzorek byl následně opláchnut vodou a vysušen.
- Povrch vzorků byl leptán pro zviditelnění austenitické struktury, následoval oplach, pasivace lihem a vysušení.
- Struktura vzorku byla sledována pomocí optického metalografického mikroskopu NEOPHOT.



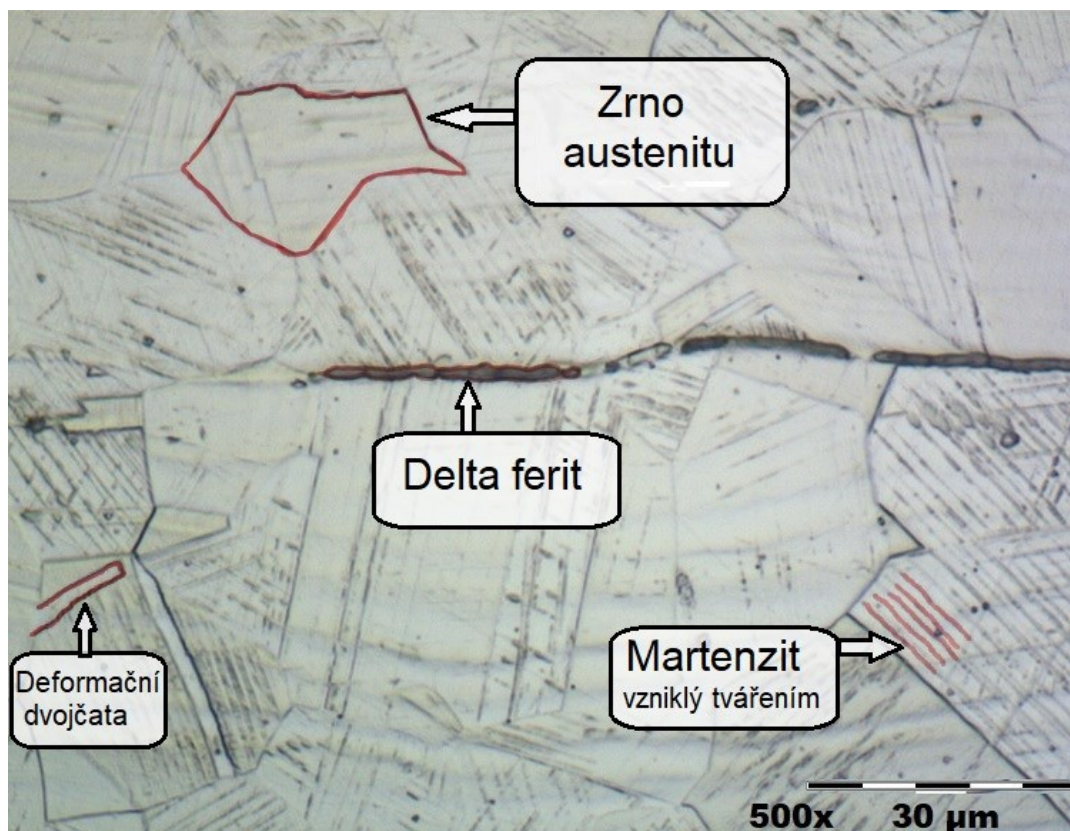
Obrázek 40 – Vlevo kotoučová bruska Struers LaboPol-25, vpravo vzorek v bakelitu po prvním broušení.



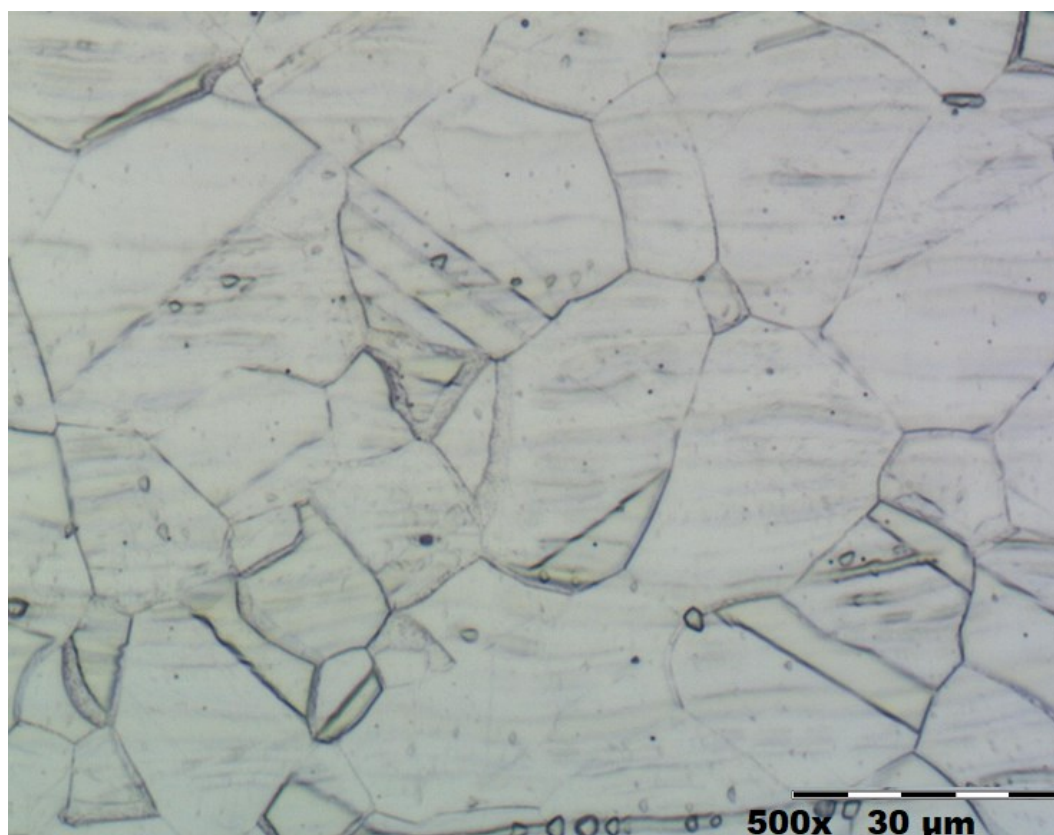
Obrázek 41 – Ocel 1.4307N (netvářená), 100 násobné zvětšení, obecný pohled na povrch.



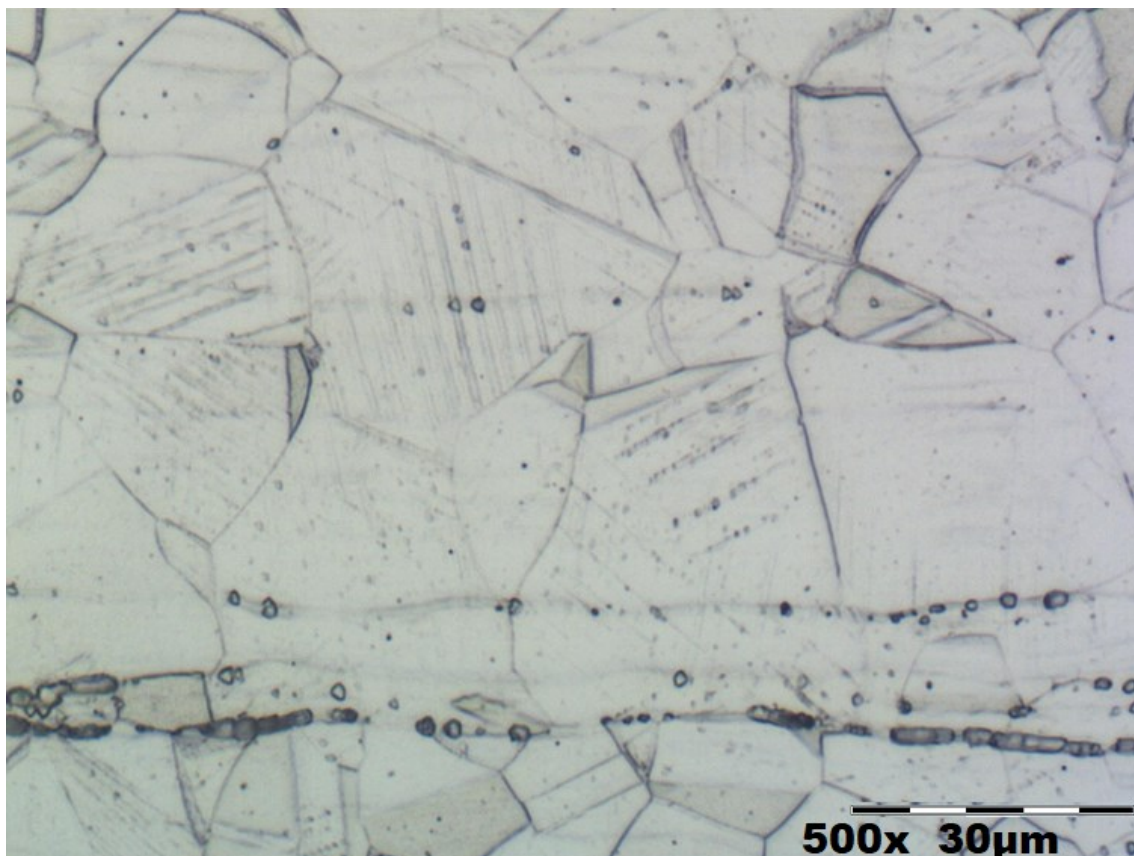
Obrázek 42 – Ocel 1.4307N (netvářená), 500 násobné zvětšení.



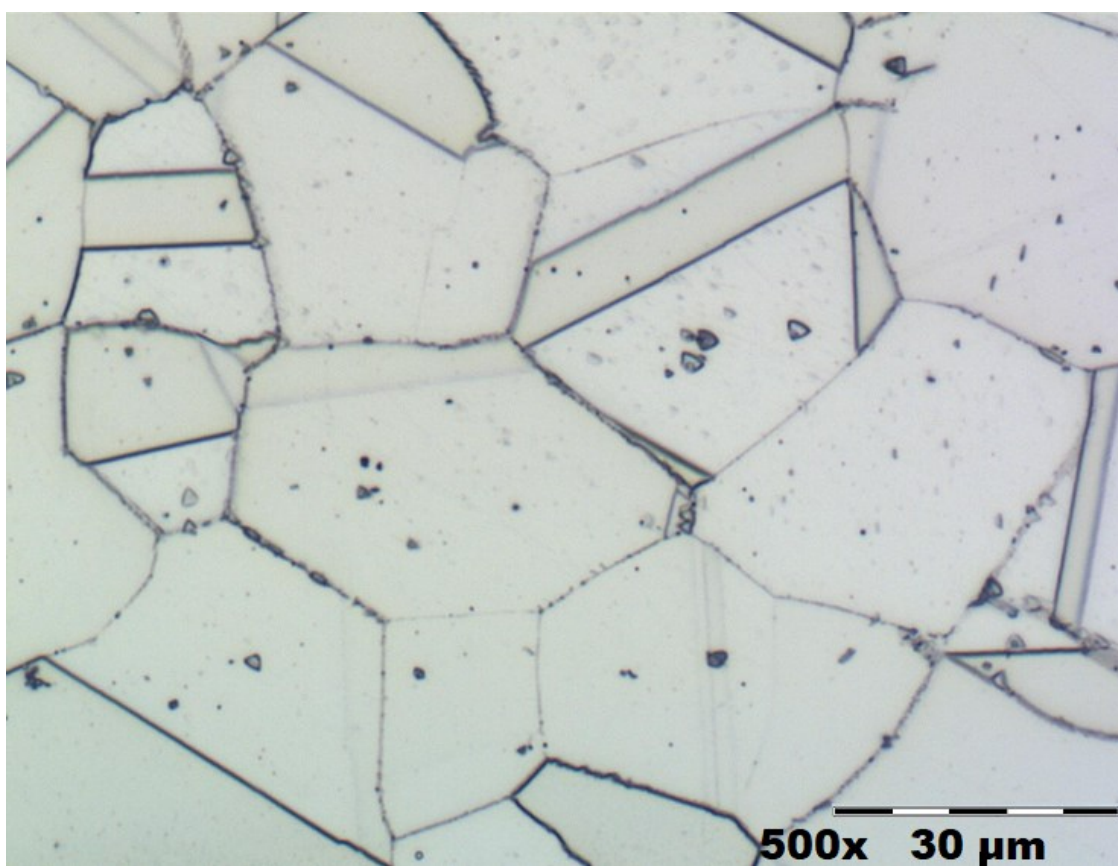
Obrázek 43 – Ocel 1.4307T (tvářená), 500 násobné zvětšení.



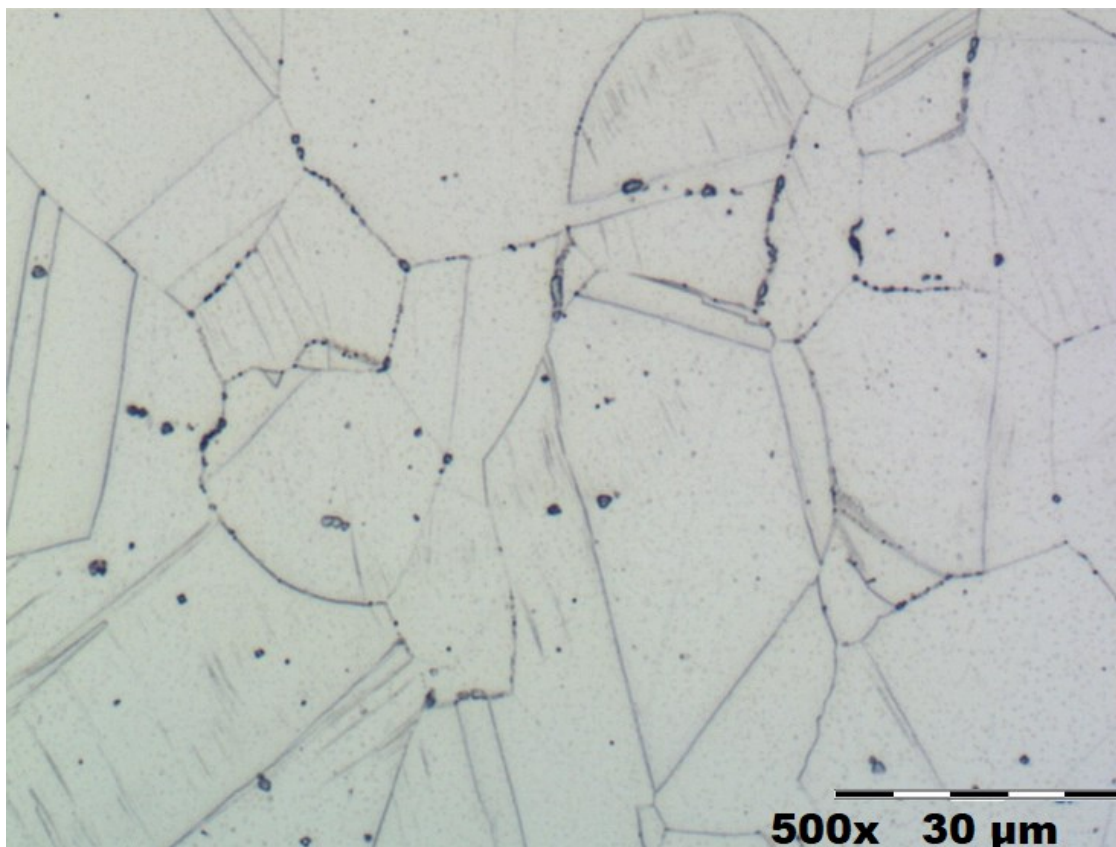
Obrázek 44 – Ocel 1.4404N (netvářená), 500 násobné zvětšení.



Obrázek 45 – Ocel 1.4404T (tvářená), 500 násobné zvětšení.



Obrázek 46 – Ocel 1.4845N (netvářená), 500 násobné zvětšení.



Obrázek 47 – Ocel 1.4845T (tvářená), 500 násobné zvětšení.

Dílčí závěr

Metalografický rozbor vybraných typů ocelí byl proveden na celém příčném řezu zkušebních vzorků. Z metalografického rozboru vybraných typů ocelí před tvářením bylo zjištěno, že v základní austenitické struktuře (paramagnetická fáze) se ve struktuře vyskytuje feromagnetická fáze δ -ferit. Po tváření za studena byla navíc zjištěna ve struktuře další feromagnetická fáze – deformační martenzit (α').

7.6 Měření mikrotvrdomosti podle Vickerse na příčném řezu ocelí po tváření metodou DRECE

Zkouška tvrdosti podle Vickerse je takzvanou statickou zkouškou tvrdosti materiálu. Způsob jejího provedení byl popsán a ujednocen normou ČSN EN ISO 6507-1. Princip spočívá ve vnikání indentoru do zkoumaného materiálu a následného zjišťování míry deformace tohoto materiálu. Jako indentor se v tomto případě používá diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° , měřítkem tvrdosti materiálu jsou délky dvou úhlopříček vtisknutého jehlanu. Vickersova zkouška se označuje HV, je značně univerzální, lze ji použít na tvrdé i měkké materiály. Její výhodou je též to, že výsledná

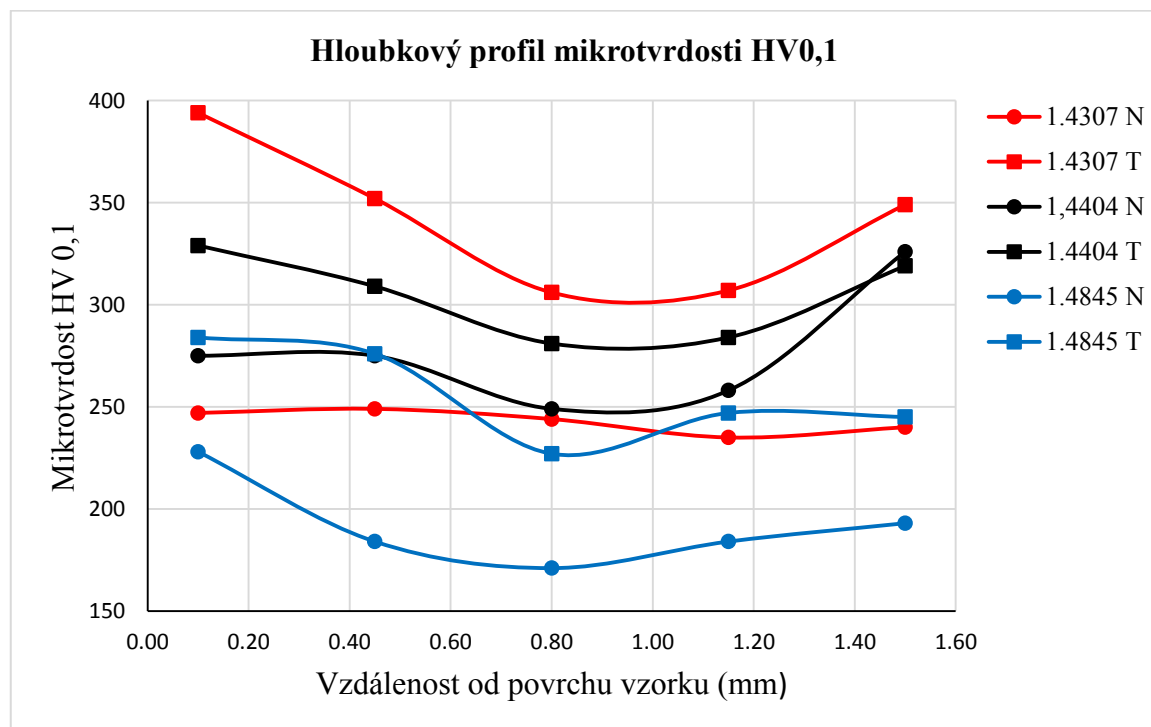
hodnota tvrdosti nezávisí na zatěžovací síle. Pakliže zatížení při zkoušce tvrdosti nepřesahuje 1 kg, hovoříme o mikrotvrdosti. [24]

Měření mikrotvrdosti bylo provedeno na příčném řezu metalografického výbrusu a zahrnovalo 5 měření s rozstupem 0,35 mm. Vývoj mikrotvrdosti jednotlivých typů oceli na příčném řezu byl v závislosti na vzdálenosti od povrchu vzorku vynesena v obrázku 48.

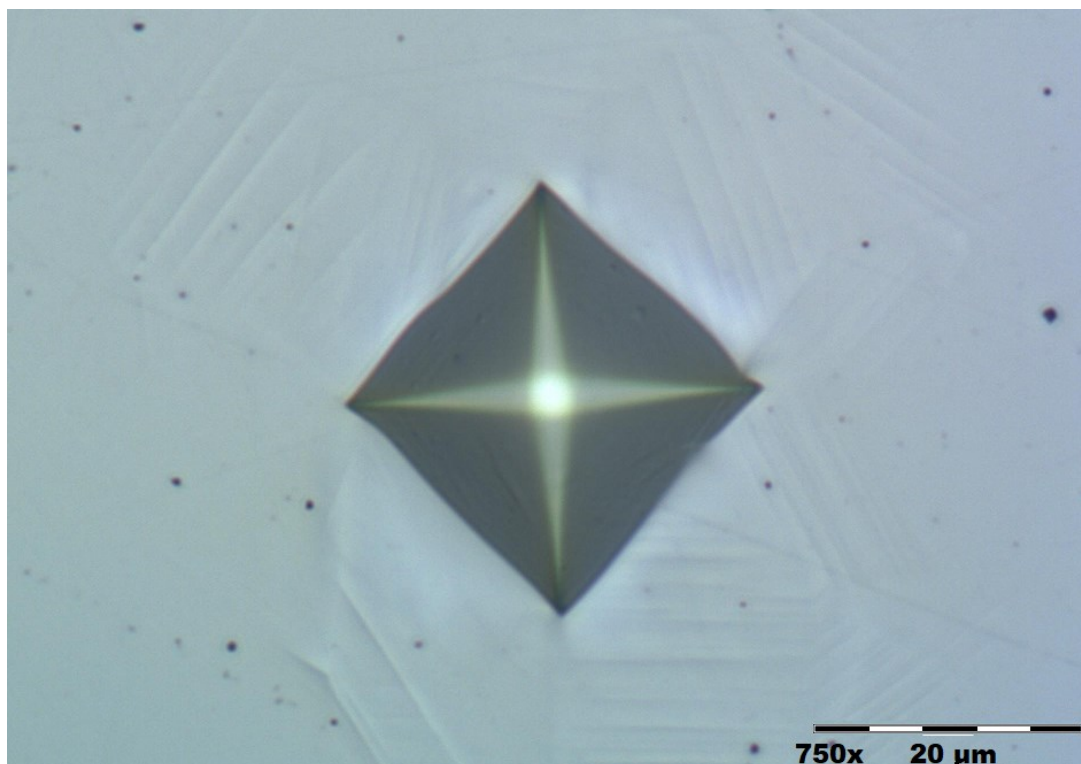
Tabulka 19 – Tabulka výsledků zkoušky mikrotvrdosti. [25]

Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse HV 0,1			
Zátěž:	100 g	Čas:	13 s
Ocel		Průměrná mikrotvrdost HV 0,1	
1.4307 netvářená		243 ± 5,6	
1.4307 DRECE		341 ± 36,7	
1.4404 netvářená		276 ± 29,8	
1.4404 DRECE		304 ± 21,2	
1.4845 netvářená		192 ± 21,6	
1.4845 DRECE		255 ± 23,6	
		Nárůst průměrné mikrotvrdosti po tváření	
		+98 HV 0,1; +40,3 %	
		+28 HV 0,1; +10,1 %	
		+63 HV 0,1; +32,8 %	

Obrázek 48 názorně zobrazuje mikrotvrdost na příčném řezu testovaných ocelí.



Obrázek 48 – Hloubkový profil mikrotvrdosti.



***Obrázek 49** – Mechanická deformace v místě vtisku indentoru do oceli 1.4845N.*

Dílčí závěr

Z výsledků měření mikrotvrdosti austenitických korozivzdorných oceli před a po tváření metodou DRECE je vidět, že se při tváření za studena tyto oceli zpevňují. U všech vybraných typů ocelí došlo po tváření za studena ke zvýšení hodnoty mikrotvrdosti, což může být způsobeno nárůstem martenzitické fáze po tváření a zpevněním materiálu. Z hloubkového profilu mikrotvrdosti je vidět, že největší mikrotvrdost mají oceli na povrchu. Mikrotvrdost ocelí je nejvyšší na povrchu vzorků a směrem ke středu vzorků klesá. K největšímu nárůstu mikrotvrdosti došlo u oceli s označením 1.4307 a nejmenšímu u oceli 1.4404. Nárůst průměrné mikrotvrdosti odpovídá informacím z tab. 6.

8 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo studium objemových magnetických vlastností austenitických korozivzdorných ocelí po tváření za studena. Pro diplomovou práci byly vybrány tři typy těchto ocelí (1.4307, 1.4404, 1.4845). Pro průmyslové aplikace je austenitická ocel velmi dobře tvářitelná i svařitelná a navíc lze využít vynikajících vlastností ve velkém spektru provozních teplot.

Pro experimentální zkoušky byly připraveny čtyři sady vzorků. První sada obsahovala vzorky těchto ocelí bez tváření (tak jak byly zakoupeny ve formě plechu o tloušťce 2 mm). Druhá a třetí sada obsahovala vzorky tvářené za studena. Pro přípravu vzorků tvářením byly použity dva postupy. Druhá sada vzorků byla připravena metodou DRECE. Tento tvářecí proces je založen na technologii protlačování s nulovou změnou rozměrů příčného průřezu s konečným cílem dosažení vysokého stupně deformace ve tvářeném materiálu. Ve třetí sadě bylo využito zkoušky ohybem dle normy ČSN EN ISO 7438:2016. Zkušební těleso je podepřeno dvěma válcovými podpěrami z jeho spodní strany. Z horní strany je do zkušebního tělesa vtlačován válcový trn. Trn způsobuje ohyb zkušebního tělesa. Čtvrtá sada vzorků byla sestavená z těchto typů oceli po tváření metodou DRECE s následným žiháním ve vakuové peci při teplotě 950°C po dobu 30 minut a pomalých chladnutím v peci.

Vzorky jednotlivých typů ocelí byly následně analyzovány měřením objemových magnetizačních křivek užitím vibračního magnetometru VSM EV9 a také doplňujícími metodami, jako jsou skenovací elektronová mikroskopie a chemická analýza povrchů ocelí, určení struktury ocelí pomocí Mössbauerovy spektroskopie γ -BMS, metalografický rozbor struktury oceli a měření mikrotvrdosti podle Vickerse. Z provedené komplexní analýzy byly vyhodnoceny následující závěry.

Z výsledku měření mikrotvrdosti austenitických korozivzdorných ocelí, které byly tvářeny za studena metodou DRECE bylo zjištěno, že všechny vybrané typy ocelí se po plastické deformaci za studena zpevňují. Deformační zpevnění je způsobeno také částečnou transformací austenitické fáze oceli na tvrdší martenzit. Nejvyššího stupně zpevnění bylo dosaženo u oceli 1.4307. Nejvyšší hodnota mikrotvrdosti naměřená v blízkosti povrchu oceli 1.4307 je 394 HV_{0,1}, což je oproti výchozímu nezpevněnému stavu materiálu o 147 HV_{0,1} více. Ocel s označením 1.4845 vykazovala nejnižší hodnoty mikrotvrdosti v blízkosti povrchu před i po tváření metodou DRECE. Tyto výsledky dobře korespondují s množstvím tvrdší martenzitické fáze zjištěné Mössbauerovou spektroskopií.

Metalografickým rozbořem struktury na celém příčném řezu (objemová metoda) všech typů oceli před tvářením metodou DRECE bylo prokázáno, že v základní austenitické matici (paramagnetická fáze) se vyskytuje i delta ferit (feromagnetická fáze). Zatímco Mössbauerova spektroskopie γ -BMS citlivá k povrchu do hloubky přibližně 25 μm nedetekuje žádné feromagnetické fáze, struktura je plně austenitická.

Po tváření metodou DRECE je metalografickým rozbořem zjištěno, že ve struktuře ocelí se nachází navíc deformační martenzit, jako druhá feromagnetická fáze. Mössbauerova spektroskopie γ -BMS po tváření detekuje magnetický příspěvek jedné fáze. Největší množství feromagnetické fáze detekované Mössbauerovou spektroskopii po tváření metodou DRECE bylo zjištěno u oceli 1.4307 (33,3 %), u oceli 1.4404 (9,1 %) a ocel 1.4845 vykazovala před i po tváření plně austenitickou strukturu. Z tohoto strukturního rozboru je vidět, že feromagnetická fáze delta ferit se vyskytuje pod povrchem oceli v hloubce větší než je citlivost Mössbauerovy spektroskopie.

Objemové magnetizační křivky znázorňující závislost hmotnostní magnetizace vybraných typů oceli na intenzitě magnetického pole ukazují, že všechny oceli se značením 1. 4307 ($Ni/Cr = 0,454$), 1.4404 ($Ni/Cr = 0,581$) a 1.4845 ($Ni/Cr = 0,780$) vykazují již na netvářených zakoupených ocelích slabě feromagnetické chování, které je způsobené delta feritem ve struktuře. Po tváření za studena metodou DRECE i ohybem vykazují tyto oceli změnu magnetických vlastností, a to vyšší hodnoty remanentní magnetizace a magnetizace M_{20} při intenzitě magnetického pole 20 kOe. Největší hodnoty remanentní magnetizace a magnetizace M_{20} vykazují po tváření oceli 1.4307 a 1.4404, které mají nejnížší poměr obsahu Ni/Cr . Zanedbatelné změny těchto magnetických parametrů jak po tváření metodou DRECE i ohybem vykazuje ocel 1.4845, která má nejvyšší poměr Ni/Cr . Experimentální vzorky všech typů ocelí žíhané nad teplotou překrystalizace po tváření metodou DRECE vykazovaly nižší hodnoty remanentní magnetizace a magnetizace M_{20} než ocel netvářená (po zakoupení), vykazovaly paramagnetické chování.

Ze tří vybraných typů austenitických korozivzdorných ocelí vykazuje ocel s označením 1.4307 největší změnu remanentní magnetizace. Tento typ oceli vykazuje nejmenší niklový ekvivalent (tj. obsahuje nejmenší podíl austenitotvorných prvků). Ocel 1.4307 obsahuje austenitickou strukturu, která je nejméně stabilní. Z vybraných ocelí má ocel 1.4307 největší sklon k martenzitické transformaci při plastické deformaci. Austenitická struktura oceli 1.4845 byla velice stabilní po tváření za studena, malý rozdíl v magnetických vlastnostech u této oceli se projevil pouze po vyžhání. Tato ocel je vhodná pro aplikace, kde hrozí zvýšené riziko zmagnetování (např. v blízkosti elektromotorů). Z výsledků

měření bylo zjištěno, že čím vyšší je poměr Ni/Cr , tím stabilnější je austenitická struktura a menší magnetickou odezvu vyvolá deformace za studena.

Pro odstranění zbytkového magnetismu u tvářených austenitických ocelí je vhodné tyto oceli tepelně zpracovat ohřevem nad teplotu překrystalizace s pomalým ochlazením. Vysoká teplota umožní to, že martenzit vyvolaný tvářením za studena se znovu transformuje na austenit a ocel se stane paramagnetickou.

Cena ocelí je podmíněna obsahem legujících prvků, u austenitických korozivzdorných ocelí především obsahem niklu. Se zvyšujícím se obsahem niklu stoupá cena oceli.

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Khanna Vinod Kumar. *Implantable Medical Electronics Prosthetics, Drug Delivery, and Health Monitoring*. Springer: International Publishing Switzerland, 2016. ISBN 978-3-319-25446-3.
- [2] SILBERNAGEL, Arnošt. *Nauka o kovech pro střední průmyslové školy hutnické. Část 2*. 2. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1979.
- [3] PÍŠEK, František, Ladislav JENÍČEK, Přemysl RYŠ, Mojmír CENEK a Antonín HRBEK. *Nauka o materiálu*. I, Nauka o kovech. 2. rozš. a zcela přeprac. vyd. Praha: Academia, 1968.
- [4] ASHBY, M. F. a David Rayner Hunkin JONES. *Engineering materials 2: an introduction to microstructures, processing and design*. Oxford: Pergamon Press, 1986. ISBN 0-08-032532-7.
- [5] ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Praha: Academia, 1999. ISBN 80-200-0671-0.
- [6] HUBÁČKOVÁ, Jiřina, Vladimír ČÍHAL a Karel MAZANEC. Martenziticko-austenitické korozivzdorné oceli typu Cr13-16Ni4-6. *Hutnické aktuality b*. Dobrá: Výzkumný ústav hutnictví železa (Dobrá), 1986, **27**(7), 3-56. ISSN 0322-8525.
- [7] TVRDÝ, Miroslav, R. SEIDL, Ludmila HYSPECKÁ a Karel MAZANEC. Povrchová segregace prvků u vybraných austenitických ocelí. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské v Ostravě. Řada hutnická d*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1977, **23**(3), 1-13. ISSN 0474-8484.
- [8] MAZANCOVÁ, Eva. *Materiály pro náročné technické aplikace – materiály na bázi železa*. [cit. 2011-07-05]. 2013. Po přihlášení je plný text dostupný z: http://katedry.fmfi.vsb.cz/Opory_FMFI/636/636Materiály_pro_narocne_techicke_aplikace.pdf
- [9] KITTEL, Charles. *Úvod do fyziky pevných látek*. Přeložil Miloš MATYÁŠ. Praha: Academia, 1985.
- [10] KŘIVÝ, Ivan a Dalibor DVOŘÁK. *Úvod do teorie fyziky pevných látek*. (Díl) 2. Ostrava: Ostravská univerzita, 1992. ISBN 80-7042-059-6.
- [11] KVASNICA, Jozef. *Teorie elektromagnetického pole*. Praha: Academia, 1985.
- [12] HAŇKA, Ladislav. *Teorie elektromagnetického pole*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1975.
- [13] BEDNÁŘ, Jan. *Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz*. Praha: Prometheus, 1999. ISBN 80-7196-151-5.

- [14] CHARAKTERISTIKA KOROZIVZDORNÝCH MATERIÁLŮ A ZÁKLADNÍ INFORMACE O POUŽITÍ, ZPRACOVÁNÍ, SVAŘOVÁNÍ A MOŽNÉ KOROZI | Italinox. Italinox [online]. Copyright © Všechna práva vyhrazena Italinox [cit. 12.05.2018]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-2>
- [15] RUSZ, Stanislav, Stanislav TYLŠAR, Jan KEDROŇ, Lubomír ČÍŽEK, Karel MALANÍK, Jan DUTKIEWICZ a Tibor DONIČ. New design of the forming equipment DRECE for obtaining UFG structure in strip of sheet. *Archives of Materials Science and Engineering*. Czenstochowa: International OCSCO World Press, 2010, s. 111-118. ISSN 1897-2764.
- [16] MICHENKA, Vít, Stanislav RUSZ, Milan GOTTWALD, Karel MALANÍK, Ivan KEDROŇ a Stanislav TYLŠAR. Evaluation of DRECE forming process of Cu-based alloys and proposal of testing method for evaluation of UFG materials microstructural stability. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada strojní d.* Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010, **56**(2), 131-141. ISSN 1210-0471.
- [17] JANČA, Michal. Zjemňování struktury v pásu plechu na zařízení DRECE (online). Ostrava, 2011 (cit. 2018-05-02). Dostupné z: <<https://theses.cz/id/fl4rrg/>>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní. Vedoucí práce Stanislav Rusz.
- [18] ŽIVOTSKÝ, Ondřej, HENDRYCH, Aleš, KLIMŠA, Ladislav, HAMRLE, Jaroslav. Využití vibračního magnetometru VSM ke studiu magnetických vlastností pevných a práškových materiálů. *Hutnické listy*. Ostrava: Ocelot, 2011, **64**(3), s. 80-84. ISSN 0018-8069.
- [19] FLEGLER, Stanley L., John William HECKMAN a Karen L. KLOMPARENS. *Scanning and transmission electron microscopy: an introduction*. New York: Oxford University Press, 1995. ISBN 0-19-510751-9.
- [20] *ANSI/AWS A4.2M/A4.2:1997 Standard procedures for calibrating magnetic instruments for measure the delta ferrite content of austenitic and duplex ferritic-austenitic stainless steel weld metal*. Miami: American Welding Society, 1998. ISBN 0-87171-534-1.
- [21] Technická dokumentace k vibračnímu magnetometru VSM EV9 firmy MicroSense.
- [22] ČSN ISO 7438:2016, *Kovové materiály – zkouška ohybem*. Praha: Český normalizační institut, 2016.
- [23] *Statistical methods in practice: for scientists and technologists*. Hoboken: Wiley, pages: 83-100, 2009. ISBN 978-0-470-74929-6.
- [24] *ASTM E384-10e2 Standard test method for Knoop and Vickers hardness of materials*. West Conshohocken: ASTM International, 2010.
- [25] NĚMEČEK, Pavel. *Nejistoty měření*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2008. ISBN 978-80-02-02089-9.

10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Diagram polymorfie čistého železa.	3
Obrázek 2 – Fázový diagram železo – uhlík. [4]	5
Obrázek 3 – Schaefflerův diagram. [5]	9
Obrázek 4 – Vznik martenzitu. [8]	12
Obrázek 5 – Diagram pevnosti oceli. [3]	13
Obrázek 6 – magnetický moment atomu. [9,10]	16
Obrázek 7 – Diamagnetikum.	18
Obrázek 8 – Paramagnetikum.	19
Obrázek 9 – Stoletova křivka železa z r. 1871, univerzita Heidelberg . [10]	20
Obrázek 10 – Osy magnetizace.	21
Obrázek 11 – Schématické znázornění Weissových domén a) bez působení vnějšího magnetického pole b) ve slabém vnějším poli c) v silném vnějším poli d) ve stavu nasycení. [12]	22
Obrázek 12 – Magnetizační křivka feromagnetika.	23
Obrázek 13 – Řezání oceli kapalinovým paprskem.	26
Obrázek 14 – Pozice testovaných ocelí v Schaefflerově diagramu.	28
Obrázek 15 – Dodané plechy korozivzdorných austenitických ocelí.	28
Obrázek 16 – Vlevo celé zařízení DRECE, vpravo hlavní tlaková část.	30
Obrázek 17 – Princip metody DRECE pro protlačování pásu plechu. [15]	32
Obrázek 18 – Ocel po tváření DRECE.	32
Obrázek 19 – Zkouška ohybem. [22]	33
Obrázek 20 – Ocelové vzorky tvářené ohybem.	34
Obrázek 21 – SEM, EDX bodová analýza povrchu netvářených typů oceli.	36
Obrázek 22 – EDX spektra ocelí.	37
Obrázek 23 – Schéma VSM. [21]	38
Obrázek 24 – Vibrační magnetometr EV9 VSM firmy MicroSense.	39
Obrázek 25 – Magnetizační křivky oceli 1.4307 (Z, N, T).	42
Obrázek 26 – Magnetizační křivky oceli 1.4307 (Z, N, T) – detail.	42
Obrázek 27 – Magnetizační křivky oceli 1.4404 (Z, N, T).	43
Obrázek 28 – Magnetizační křivky oceli 1.4404 (Z, N, T) – detail.	43
Obrázek 29 – Magnetizační křivky oceli 1.4845 (Z, N, T).	44
Obrázek 30 – Magnetizační křivky oceli 1.4845 (Z, N, T) – detail.	44
Obrázek 31 – Magnetizační křivky oceli 1.4307 (zkouška ohybem).	47
Obrázek 32 – Magnetizační křivky oceli 1.4307 (zkouška ohybem – detail).	47
Obrázek 33 – Nastavení Mössbauerova spektrometru, režim γ -BMS.	49
Obrázek 34 – Mössbauerova spektra oceli 1.4307.	51
Obrázek 35 – Mössbauerova spektra oceli 1.4404.	52
Obrázek 36 – Mössbauerova spektra oceli 1.4845.	53
Obrázek 37 – Korelace mezi Ni_{ekv} (%) a množstvím feromagnetické fáze (%) v oceli po tváření metodou DRECE.	54
Obrázek 38 – Korelace mezi Ni/Cr a magnetizací M_{20} v ocelích po tváření metodou DRECE.	55
Obrázek 39 – Závislost remanentní magnetizace na množství martenzitu v testovaných ocelích po tváření DRECE. [23]	56
Obrázek 40 – Vlevo kotoučová bruska Struers LaboPol-25, vpravo vzorek v bakelitu po prvním broušení.	57
Obrázek 41 – Ocel 1.4307N (netvářená), 100 násobné zvětšení, obecný pohled na povrch.	58
Obrázek 42 – Ocel 1.4307N (netvářená), 500 násobné zvětšení.	58

Obrázek 43 – Ocel 1.4307T (tvářená), 500 násobné zvětšení.	59
Obrázek 44 – Ocel 1.4404N (netvářená), 500 násobné zvětšení.	59
Obrázek 45 – Ocel 1.4404T (tvářená), 500 násobné zvětšení.	60
Obrázek 46 – Ocel 1.4845N (netvářená), 500 násobné zvětšení.	60
Obrázek 47 – Ocel 1.4845T (tvářená), 500 násobné zvětšení.	61
Obrázek 48 – Hloubkový profil mikrotvrdosti.	62
Obrázek 49 – Mechanická deformace v místě vtisku indentoru do oceli 1.4845N.	63

11 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Polymorfie železa. [2]	4
Tabulka 2 – Legující prvky korozivzdorných austenitických ocelí. [6] [7]	10
Tabulka 3 – Označení testovaných ocelí.	27
Tabulka 4 – Hmotnostní chemické složení legujících prvků měřených ocelí (materiálové listy).	27
Tabulka 5 – Vypočtené ekvivalenty Ni_{ekv} a Cr_{ekv} pro jednotlivé typy oceli	27
Tabulka 6 – Použití korozivzdorných ocelí. [14]	29
Tabulka 7 – Mez pevnosti v tahu R_m a mez kluzu v tahu $R_p 0,2$ vybraných ocelí (materiálové listy).	30
Tabulka 8 – Technické parametry tvářecího zařízení. [15, 16]	31
Tabulka 9 – Norma ČSN EN ISO 7438.	33
Tabulka 10 – Zkouška ohybem. [22]	33
Tabulka 11 – Převod jednotek ze soustavy CGS na jednotky soustavy SI.....	40
Tabulka 12 – Technické parametry VSM EV9. [18, 21].....	41
Tabulka 13 – Parametry nastavení magnetického pole při měření a krok měření.....	41
Tabulka 14 – Parametry magnetizačních křivek vzorků před tvářením, po tváření DRECE a po žihání.....	45
Tabulka 15 – Naměřené hodnoty pro oceli tvářené zkouškou ohybem.....	46
Tabulka 16 – Naměřené hodnoty pro netvářené oceli (po zakoupení).	46
Tabulka 17 – Naměřené hodnoty γ -BMS.	50
Tabulka 18 – Závislost magnetických parametrů a množství austenitu na poměru prvků Ni/Cr v ocelích po tváření metodou DRECE.....	55
Tabulka 19 – Tabulka výsledků zkoušky mikrotvrdosti. [25]	62

12 SEZNAM PŘÍLOH

Přílohy jsou uvedeny pouze v elektronické podobě na přiloženém CD:

Příloha 1 – Materiálové listy vybraných typů austenitických korozivzdorných ocelí

Příloha 2 – Protokoly měření mikrotvrdosti

Příloha 3 – Fotografie z metalografické analýzy ocelí na příčném řezu